Е. М. ЛОПУХИНА и Г. С. СОМИХИНА

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Е. М. ЛОПУХИНА и Г. С. СОМИХИНА

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-5(4)-3

Книга посвящена основным вопросам проектирования асинхронных микродвигателей с короткозамкнутым ротором трехфазного и однофазного тока.

Изложены основы электромагнитного и элементы теплового расчетов, а также некоторые особенности конструкции асинхронных микродвигателей.

Рекомендуются единые методика выбора основных размеров и схема расчета для всех типов трехфазных и однофазных машин. Приведены расчетные формулы и необходимые для практических расчетов материалы с учетом новейших советских и зарубежных исследований в этой области.

Принятые методы расчета различных типов машин иллюстрируются примерами.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов электротехнических и энергетических вузов и может быть полезной для инженеров, проектирующих микромашины.

6П2.12 *Лопухина Елена Моисеевна и*
Сомихина Галина Сергеевна

Л77 РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

312с с черт. и табл.

6П2.12

Редактор *Л. М. Петрова* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 22/XII 1960 г. Подписано к печати 20/III 1961 г.
Формат бумаги 84×108 1/32 15,99 п. л. 18,2 уч.-изд. л.
Т-03569 Тираж 17 000 Цена 1 р. 01 к. Зак. 2637

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возрастающее применение машин малой мощности в промышленности, сельском хозяйстве, для автоматических и счетно-решающих устройств, для привода разнообразных механизмов, а также для бытовых приборов побудило авторов написать книгу по расчету асинхронных микродвигателей.

Книга предназначена в качестве учебного пособия при курсовом и дипломном проектировании студентов втузов и может быть также использована инженерами и техниками, проектирующими микромашины. В книге использованы опыт курсового и дипломного проектирования микромашин в Московском энергетическом институте, расчетные методики Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики (ВНИИ ЭМ), опыт создания единых серий микродвигателей, а также советская и зарубежная литература.

Книга включает результаты многолетних научных исследований, проведенных авторами в лаборатории микромашин МЭИ, руководимой проф. Ю. С. Чечетом, работы которого во многом способствовали развитию теории и методики расчета электрических микромашин.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить заведующего кафедрой электрических машин, заслуженного деятеля науки, проф. Г. Н. Петрова за весьма ценные указания и советы.

Авторы выражают благодарность инж. Н. А. Мушкетову за содействие в подборе материалов и ряд полезных замечаний, а также технику Т. П. Ильиной за помощь в оформлении рукописи.

Работа между авторами распределена следующим образом: введение, гл. 1, 2, 8, 9 и приложения написаны совместно, гл. 4—7 и 12, § 13-2, 13-3 и 13-5—Е. М. Лопухиной и гл. 3, 10, 11, § 2-4, 13-1 и 13-4—Г. С. Сомихиной.

Поскольку настоящее пособие является первой попыткой обобщить и систематизировать материалы по расчету асинхронных микродвигателей общего применения и создать единую методику расчета двигателей трехфазного и однофазного тока, естественно, оно не может быть лишено недостатков, и авторы с признательностью примут все замечания, направленные на его улучшение.

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины малой мощности — сравнительно новая область машиностроения, появившаяся в СССР около 20 лет назад и развивающаяся в настоящее время бурными темпами. Особенно велика перспектива ее роста в связи с решениями XXI съезда партии и семилетним перспективным планом развития народного хозяйства Советского Союза.

К микромашинам относятся электрические машины мощностью от долей ватта до 500 *вт*. Их можно разделить на две основные группы: 1) микромашины общего применения и 2) специальные микромашины, применяемые для автоматических устройств, самолетных, судовых и других механизмов управления.

Основными потребителями машин общего применения являются легкая (текстильная, кожевенная и др.), пищевая, медицинская промышленность, сельское хозяйство, предприятия общественного питания, быт. Они применяются также как вспомогательные силовые двигатели в различных автоматических устройствах.

Асинхронные микродвигатели с короткозамкнутым ротором, как трехфазные, так и однофазные, являются самыми распространенными типами двигателей переменного тока. Они применяются для привода мелких станков, центрифуг, компрессоров, насосов, вентиляторов, конторских машин, звукозаписывающих и звукоснимающих аппаратов, машин для стрижки овец и дойки коров, холодильных машин, стиральных машин, соковыжималок, сушилок и др.

Особенно широкое распространение получили однофазные асинхронные двигатели, поскольку для их работы достаточно наличия однофазной коммунальной сети.

Асинхронные микродвигатели имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами машин, в частности с коллекторными:

1) относительная простота конструкции и невысокая стоимость производства;

2) отсутствие источника радиопомех;

3) меньшая шумность двигателя;

4) бóльшие простота и надежность в эксплуатации.

К недостаткам асинхронных двигателей следует отнести относительно плохие регулировочные характеристики.

Однако этот недостаток относится лишь к машинам нормального исполнения с короткозамкнутым ротором. Специальные асинхронные машины с полым немагнитным и ферромагнитным, массивным ферромагнитным роторами, с короткозамкнутым ротором повышенного сопротивления допускают регулирование скорости в широких пределах. Ступенчатое регулирование скорости применяется в трехфазных и однофазных многоскоростных двигателях.

Данная работа посвящена методике расчета и проектированию асинхронных микромашин общего применения с нормальным короткозамкнутым ротором.

В настоящее время в СССР выпускаются различные асинхронные микродвигатели общего применения (табл. В-1). Существует единая серия асинхронных микродвигателей, охватывающая трехфазные (АОЛ) и однофазные (АОЛБ) микромашины в диапазоне мощностей 18—600 *вт*, двухполюсные и четырехполюсные. Ведется большая работа по модернизации этой серии и проектированию различных модификаций: тихоходных двигателей, малошумных, на повышенную частоту (быстроходных), встроенного исполнения и др. В частности, ВНИИ ЭМ разработан проект двух новых серий встроенных двигателей АВ — трехфазные двигатели мощностью 30—600 *вт*, АВЕ — однофазные конденсаторные двигатели 10—400 *вт*.

Семилетний перспективный план развития народного хозяйства СССР предусматривает строительство большого количества заводов, специализирующихся по производству микромашин, в том числе и микромашин общего применения.

Классификация и выбор типа микродвигателей

Асинхронные микродвигатели в зависимости от числа фаз питающей сети и характера пусковых элементов подразделяются на следующие типы:

1. Трехфазные ($m=3$).

2. Однофазные с пусковыми элементами во вспомогательной фазе ($m=1$):

а) с пусковым сопротивлением (внесенным или внешним);

двигатели с сопротивлением, внесенным во вспомогательную обмотку, называются также машинами с повышенным сопротивлением пусковой фазы;

б) с пусковой емкостью.

3. Конденсаторные ($m=2$):

а) с пусковой и постоянно включенной емкостями;

б) с постоянно включенной емкостью.

По способу питания конденсаторные двигатели относятся к однофазным, однако при работе такого двигателя включены обе обмотки статора. Поэтому во всех расчетных формулах, содержащих число фаз, считают $m=2$.

4. Однофазные с короткозамкнутым витком на полюсе или асимметричным статором, имеющие увеличенный воздушный зазор под частью полюса, не экранированной короткозамкнутым витком.

Трехфазные двигатели, однофазные двигатели с пусковыми элементами и конденсаторные двигатели могут быть односкоростными и многоскоростными.

Кроме того, асинхронные двигатели можно подразделить по типу ротора на машины:

1) с короткозамкнутым ротором;

2) с фазным ротором;

3) со сплошным ротором: а) массивным из ферромагнитного материала; б) полым из немагнитного или ферромагнитного материала.

Классификация двигателей общего применения, их схема включения и характеристика приведены в табл. В-1.

Шкала мощностей для этих двигателей, исключая специальные встраиваемые двигатели и многоскоростные двигатели, стандартизована. Согласно ГОСТ 6435-52 электродвигатели должны изготовляться на следующие номинальные мощности: 5, 10, 18, 30, 50, 80, 120, 180, 270, 400, 600 *вт*.

Выбор типа двигателя определяется его рабочими, пусковыми и регулировочными свойствами, которые приводятся в табл. В-1. В зависимости от условий пуска однофазные двигатели могут быть условно разделены на три группы:

а) для легких условий пуска, когда пусковой* момент $M_к \leqslant 0{,}5\,M_н$ (с короткозамкнутым витком на полюсе, конденсаторные с постоянно включенной емкостью);

б) для нормальных условий пуска: $M_к = 1 \div 1{,}2 M_н$ (однофазные с пусковым сопротивлением, конденсаторные с пуско-

* Здесь и в дальнейшем под термином пусковой момент подразумевается начальный пусковой момент при $s=1$.

Классификация асинхронных микродвигателей общего примен

Тип двигателя / Характеристика двигателя	Трехфазные двигатели	Однофазные: с короткозамкнутым витком на полюсе	Однофазные: с пусковым сопротивлением
Схема двигателя			
Механическая характеристика[5] $m=f(\nu)$; $m=\frac{M}{M_{н}}$ (за исключением двигателя со сплошным ротором, у которого $m=\frac{M}{M_{к}}$); $\nu=\frac{n}{n_{с}}$			
Конструкция ротора	Короткозамкнутый	Короткозамкнутый	Короткозамкнутый
Пусковые устройства	Не требуется	Не требуется	Центробежный выключатель
Пределы мощности, *вт*	10—600	0,5—120	18—600
Напряжение, *в*	127/220; 220/380[7]	127, 220	127, 220, 380
Скорость вращения $n_{с}$, *об/мин*	1 500, 3 000	1 500, 3 000	1 500, 3 000
Регулирование скорости	Не регулируется	Не регулируется	Не регулируется
Области применения	Привод станков	Вентиляторы, соковыжималки, сушилки, проигрыватели, радиограммофоны, торговые аппараты, стиральные машины и т. п.	В настоящее время наиболее распространенный тип однофазного двигателя: стиральные машины, холодильники, киноаппараты, медицинские аппараты и др.

Примечания: 1. $r_{п}$ — пусковое сопротивление в случае, если сопротивление

2. $r_{д}$ — добавочное сопротивление. Применяется в некоторых случаях, напри

3. Мощность при пуске.

4. Двигатели выполняются также многоскоростными (обычно двухскоростными).

5. Кривые $m=f(\nu)$ построены для первой гармоники поля.

6. В настоящее время изготовляются также двигатели с к. з. витком и увели
У этих двигателей пусковой момент резко увеличивается ($m_{к}=1$). Применяется

7. В частном случае двигатели могут быть выполнены на одно напряжение.

Таблица В-I

двигатели			
с пусковой емкостью	конденсаторные		
	с постоянно включенной емкостью		с постоянно включенной и пусковой емкостями
Короткозамкнутый	Короткозамкнутый	Сплошной ферромагнитный	Короткозамкнутый
Центробежный выключатель	Не требуется	Не требуется	Центробежный выключатель
18—600	5—600	50—100[3]	5—600
127, 220, 380	127, 220, 380	110, 127, 220	127, 220, 380
1 500, 3 000	750, 1 000, 1 500, 3 000	Переменная до ~ 1 500	1 500, 3 000
Не регулируется	Не регулируется[4]	Регулируется	Не регулируется
Поршневые насосы, компрессоры, помпы, холодильные машины	Звукозапись (ведущий двигатель), бытовые приборы, насосы, мелкие станки с пуском вхолостую, вентиляторы	Звукозапись (перематывающий двигатель), бормашина	Бытовые приборы, насосы, мелкие станки

во вспомогательной фазе внешнее.
мер в двигателях для звукозаписи.

ченным воздушным зазором под частью полюса, не экранированной витком такой двигатель в стиральных машинах.

вой и постоянно включенной емкостью, конденсаторные с постоянно включенной емкостью, с короткозамкнутым витком на полюсе);

в) для тяжелых условий пуска: $M_к = 1{,}5 \div 3{,}5 M_н$ (однофазные с пусковой емкостью).

Приведенное условное деление двигателей по кратности пускового момента позволяет правильно выбрать тип однофазного двигателя. Следует иметь в виду, что повышение пускового момента у двигателей с короткозамкнутым витком достигается асимметрией воздушного зазора и двукратным экранированием полюса, а у двигателей с постоянно включенной емкостью — подбором емкости, обеспечивающей заданный пусковой момент за счет некоторого ухудшения рабочих свойств.

Кратность пускового момента однофазных двигателей с пусковым сопротивлением иногда доводится до $m_к = 2$. Особенно большие кратности пусковых моментов могут быть получены у однофазных двигателей с пусковой емкостью до $m_к = 3{,}5$. В ряде случаев у конденсаторных двигателей с постоянно включенной емкостью в конденсаторную фазу включают активное сопротивление для обеспечения равно-

Эксплуатационные показатели микро

Тип двигателя	Мощность $P_н$, *вт*	Скорость вращения		
		3 000	1 500	3 000
		η		$\cos \varphi$
Трехфазные АОЛ	30—600 18—400	0,54—0,75 —	— 0,22—0,70	0,66—0,85 —
„ АЛ	18—400 10—270	0,54—0,79 —	— 0,24—0,73	0,66—0,87 —
Конденсаторные с $C_р$ и $C_п$ АОЛД	50—600 30—400	0,41—0,73 —	— 0,33—0,67	0,98 —
С пусковой емкостью АОЛГ	30—600 18—400	0,41—0,69 —	— 0,22—0,67	0,68—0,72 —
С пусковым сопротивлением АОЛБ	30—600 18—400	0,41—0,69 —	— 0,22—0,67	0,68—0,72 —

Примечание. Двигатели АОЛД и АОЛГ будут выпускаться в ближайшее

мерности хода двигателя и уменьшения вибраций (см. § 8-2); при этом можно повысить кратность пускового момента до $m_к = 1 \div 1{,}2$.

Наилучшие эксплуатационные показатели имеют трехфазные и конденсаторные двигатели; у последних $\cos\varphi$ даже выше, чем у трехфазных.

Для сравнения свойств асинхронных двигателей различных типов можно воспользоваться, например, сводными данными по единой серии (табл. В-2). В табл. В-2 приводятся данные электродвигателей закрытого обдуваемого исполнения (АОЛ). Трехфазные двигатели выпускаются также в закрытом необдуваемом исполнении (АЛ). При этом двигатели одинаковой мощности выполняются в следующем по величине габарите и имеют несколько лучшие энергетические показатели (η и $\cos\varphi$).

Из табл. В-2 видно, что однофазные двигатели с пусковым сопротивлением (АОЛБ) имеют высокую кратность пускового тока $i_к = 6{,}5 \div 9$, значительно бóльшую, чем все остальные типы двигателей. По кратности пусковых моментов двигатели с пусковым сопротивлением (АОЛБ) и конденсаторные (АОЛД) пригодны для нормальных условий пуска, а с пусковой емкостью (АОЛГ) — для тяжелых

Таблица В-2

двигателей единой серии

(синхронная), об/мин							
1 500	3 000	1 500	3 000	1 500	3 000	1 500	Примечание
$\cos\varphi$	Кратность пускового момента $m_к$		Кратность пускового тока $i_к$		Кратность максимального момента m_m		
— 0,50—0,76	1,3—2 —	— 1,3—1,8	4—5 —	— 3—4	1,5—2,2 —	— 1,5—2	ГОСТ 8212-56
— 0,52—0,74	1,3—2 —	— 1,3—1,6	4—6,5 —	— 3—5	1,5—2,2 —	— 1,5—2	ГОСТ 8212-56
— 0,82—0,88	1—1,2 —	— 1—1,2	4—5,5 —	— 2,5—4,5	1,6—2,2 —	— 1,6—2,2	
— 0,62	2 —	— 2,2—2,5	4—6 —	— 3—4,5	1,9—2,2 —	— 1,5—1,9	
— 0,62	1 —	— 1—1,2	7,5—9 —	— 6,5—8,0	1,4—2,2 —	— 1,4—1,9	Каталог №1641 МЭП

время в связи с созданием малогабаритных конденсаторов.

условий пуска. Более подробные данные об эксплуатационных свойствах машин единой серии приведены в приложении 6.

Следует отметить, что все однофазные двигатели с пусковыми элементами должны иметь специальные пусковые устройства. Пусковое устройство включает на период пуска вспомогательную (пусковую) фазу и пусковой элемент (активное сопротивление $r_п$ или емкость $C_п$). После достижения определенной скорости (0,75 — 0,8 синхронной скорости вращения $n_с$) пусковая фаза размыкается и двигатель работает только с одной рабочей фазой, которая чаще всего создает при этих скоростях момент, больший, чем при включении обеих фаз. В конденсаторных двигателях с рабочей и пусковой емкостями пусковое устройство включает пусковую емкость на период пуска (от $s=1$ до $s=0,25 \div 0,2$). В качестве пускового устройства могут быть применены: центробежный выключатель, кнопка, реле максимального тока и пр. Наибольшее распространение получили центробежные выключатели.

Для удешевления и упрощения производства и эксплуатации асинхронных микродвигателей иногда бывает целесообразно использовать одну и ту же машину, без изменения ее конструкции и обмоточных данных, в качестве трехфазной и однофазной с различными пусковыми элементами.

Такой микродвигатель называется универсальным асинхронным микродвигателем. Его универсальность оправдывается только в том случае, если рабочие и пусковые характеристики всех производных машин получаются не менее благоприятными, чем для двигателей, специально спроектированных в качестве однофазных.

Экспериментальное исследование, проведенное на кафедре электрических машин [Л. 12], показало, что применение трехфазного асинхронного микродвигателя в качестве универсальной машины, работающей от сети трехфазного или однофазного тока, является вполне целесообразным с точки зрения технических и энергетических показателей.

В трехфазном асинхронном микродвигателе при работе его в качестве однофазного обычно рабочая фаза (главная) получается последовательным соединением двух фаз трехфазного двигателя, а третья фаза является вспомогательной — в нее включаются пусковые элементы (рис. В-1).

Кроме схем, приведенных на рис. В-1, применяется так-

же ряд других схем, изображенных на рис. В-2. Схемы на рис. В-2,*б—г* могут быть выполнены только с пусковой емкостью, с рабочей и пусковой емкостями и только с одной рабочей емкостью.

Схемы на рис. В-2,*а* и *б* применяются для случая, когда трехфазная обмотка соединена в звезду внутри машины, а схема на рис. В-2,*в* — при соединении обмотки в треугольник внутри машины.

Если в трехфазной машине выведены все шесть концов, то следует в большинстве случаев отдать предпочтение схемам на рис. В-1.

Схема рис. В-1,*а* при такой же величине пускового сопротивления, как в аналогичной схеме рис. В-2,*а*, позволяет получить значительно больший пусковой момент. Эти же преимущества имеют схемы рис. В-1,*б* и *в* по сравнению со схемами рис. В-2,*в—д*. Схема рис. В-1,*б* позволяет получить наибольший пусковой момент по сравнению с аналогичной схемой рис. В-2,*б* и обеспечивает бо́льшую перегрузочную способность. Однако в тех случаях, когда не требуется получение столь большой кратности пускового момента, можно рекомендовать применение схемы рис. В-2,*б*, обеспечивающей более равномерное распределение токов по фазам при пуске и рабочие свойства, одинаковые со схемой рис. В-1,*б*, а также меньшее напряжение на конденсаторе. Эта схема позволяет также получить кривую момента $M=f(s)$ без провалов при применении

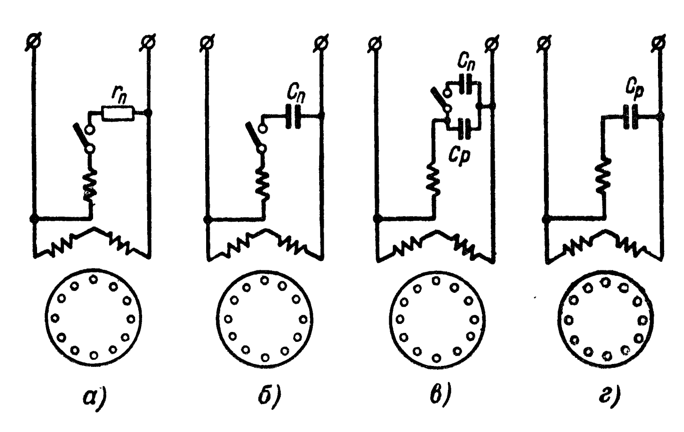


Рис. В-1. Схемы однофазного включения трехфазного двигателя.

а — с пусковым сопротивлением; *б* — с пусковой емкостью; *в* — с рабочей и пусковой емкостями; *г* — с рабочей емкостью.

однослойной диаметральной обмотки. При определенном $\cos\varphi$ машины схема рис. В-2,*б* может дать такой же пусковой момент, как схема рис. В-1,*б* [Л. 18].

Схемы рис. В-2,*г* и *д* могут быть использованы при однофазном включении двигателя на сеть, имеющую двойное напряжение по сравнению с номинальным напряжением трехфазного двигателя.

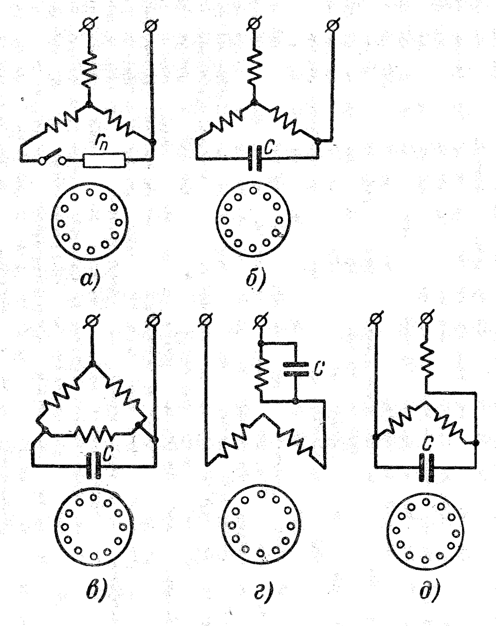


Рис. В-2. Схемы однофазного включения трехфазного двигателя.

Недостатком схем рис. В-1 является необходимость выполнения в машине двухслойных укороченных обмоток во избежание провала от третьей гармоники в кривой вращающего момента.

Проектное задание и схема расчета

При проектировании двигателя задаются:

1) номинальные данные:

номинальная полезная мощность $P_н$, *вт*;
скорость вращения (синхронная) $n_с$, *об/мин*;
число фаз m;
частота сети f, *гц*;
номинальное напряжение $U_н$, *в*;

2) режим работы (длительный, повторно-кратковременный, кратковременный);

3) условия работы: пределы колебаний температуры окружающего воздуха, влажность;

4) особые условия; в особые условия могут входить заданный характер зависимости момента от скорости вращения, регулировочные, пусковые свойства (кратности пускового момента $m_к$, пускового тока $i_к$), перегрузочная способность, т. е. заданная кратность максимального момента m_m, малошумность и др.

Кроме того, указывается рабочее положение вала — горизонтальное или вертикальное. Преобладает горизонтальная установка машин. Вертикальная установка применяется, например, в центрифугах, стиральных машинах, магнитофонах и др.

В соответствии с проектным заданием и назначением двигателя производится выбор типа двигателя (см. введение) и его исполнения (см. гл. 11). Выбор главных размеров (гл. 1) производится, исходя из номинальных данных двигателя. Особые условия учитываются при выборе электромагнитных нагрузок, расчете ротора, вспомогательной фазы, а также при решении ряда вопросов, связанных с конструкцией двигателя.

Расчет асинхронных микродвигателей рекомендуется проводить по схеме, изображенной на рис. В-3. Для трехфазных двигателей исключается расчет вспомогательной фазы. Осуществление единой методики расчета для трехфазных и всех типов однофазных двигателей достигается тем, что при выборе основных размеров однофазных двигателей вводится коэффициент использования β_S (по отношению к трехфазному двигателю) (см. § 1-1).

Особенностями предлагаемой схемы расчета асинхронных микродвигателей являются:

1) расчет рабочих характеристик по схеме замещения;

2) рациональное проектирование ротора по его параметрам, обеспечивающим выполнение специальных условий (в частности, заданной кратности максимального момента);

3) учет потерь в стали добавочным током.

В однофазных двигателях, кроме того, специфичными являются:

1) расчет главной фазы: для конденсаторного двигателя главная фаза проектируется из условий симметричного двухфазного двигателя; для двигателя с пусковыми эле-

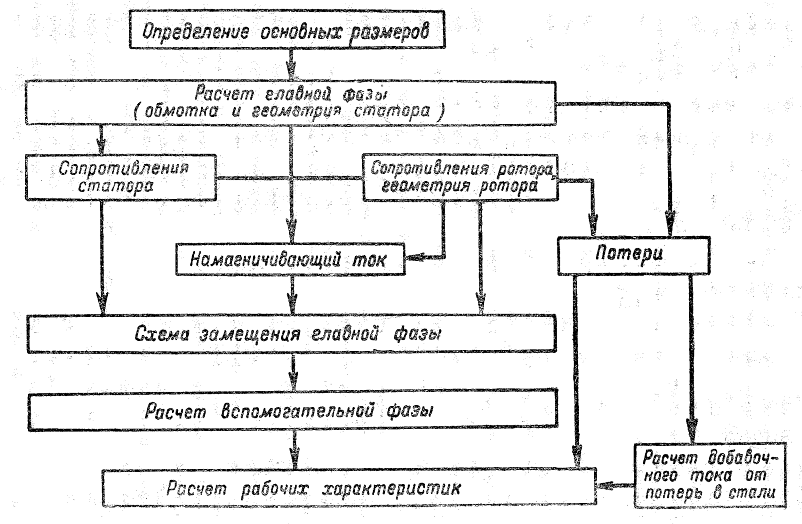


Рис. В-3. Схема расчета асинхронных микродвигателей.

ментами — из условий однофазного режима (когда включена только рабочая фаза);

2) проектирование вспомогательной фазы;

3) расчет рабочих характеристик для эллиптического и пульсирующего полей.

В последующих разделах рассматриваются подробно все этапы и особенности расчета.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

1-1. «МАШИННАЯ ПОСТОЯННАЯ» И КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Многообразие требований, предъявляемых к асинхронным микромашинам, часто противоречащих друг другу, и отсутствие обобщенных расчетных и опытных данных по выполненным машинам усложняют задачу выбора главных размеров, к которым относятся: внутренний диаметр D (наружный диаметр $D_а$) и расчетная длина статора l.

Следует указать также, что в отличие от нормальных асинхронных двигателей решение этой задачи осложняется наличием большого количества типов машин (трехфазные, однофазные, конденсаторные), имеющих различные конструктивные исполнения (закрытое, защищенное, открытое).

В литературе по проектированию нормальных асинхронных машин [Л. 1, 3 и 5] на основании рационально спроектированных и построенных двигателей, высокие технико-экономические показатели которых подтверждены многолетней эксплуатацией, приведены кривые, устанавливающие связь главных размеров, электромагнитных нагрузок и мощности:

$$D = f(P'_S);\ \tau = f(P_н);\ B_\delta,\ A = f(\tau)$$

и выведен ряд эмпирических формул, позволяющих сравнительно просто найти главные размеры машины.

По микромашинам пока еще нет такого большого опыта и обобщенных исследований, как по нормальным машинам.

В настоящей главе собран материал по выполненным асинхронным микромашинам, позволяющий обосновать выбор главных размеров.

Обычно связь между главными размерами машины устанавливается через «машинную постоянную» или обратную ей величину — коэффициент использования. Обе эти величины достаточно условны. Известны различные «машинные постоянные».

Применительно к асинхронным микродвигателям уравнение для „машинной постоянной“ Арнольда (C_A) может быть записано в следующем виде:

$$C_A = \frac{D^2 l}{P_S} n_c = \frac{8{,}6 \cdot 10^8}{B_\delta A} \beta_1 \beta_2 = \frac{8{,}6 \cdot 10^8}{B_\delta A} \beta_S \, \frac{см^3 \cdot об}{ва \cdot мин}, \qquad (1\text{-}1)$$

где D — внутренний диаметр статора, *см*;

l — длина статорного пакета, *см*;

n_c — синхронная скорость вращения, *об/мин*;

P_S — расчетная мощность (кажущаяся мощность, потребляемая двигателем из сети), *ва*;

B_δ — амплитуда магнитной индукции в зазоре, *гс*;

A — линейная нагрузка статора, *а/см*;

$\beta_S = \beta_1 \beta_2$;

β_1 — коэффициент, равный отношению полезных мощностей трехфазной и проектируемой машин одинаковых размеров:

$$\beta_2 = \frac{\eta_{I} \cos \varphi_{I}}{\eta_{III} \cos \varphi_{III}};$$

β_2 — коэффициент, равный отношению произведений к. п. д. на коэффициент мощности однофазной (конденсаторной или с пусковым элементом) и трехфазной машин.

Благодаря тому, что в уравнение (1-1) введен коэффициент β_S, оно может быть использовано в одинаковой степени для определения главных размеров трехфазных и однофазных микромашин.

Для трехфазных машин

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_S = 1.$$

По данным двигателей единой серии и двигателей иностранных фирм у конденсаторных двигателей коэффициент β_1 колеблется в пределах 1,25—1,7 и может быть в среднем принят равным 1,5. Для однофазных двигателей с пусковыми элементами β_1 колеблется от 2,2 до 2,78 и в среднем равен 2,5. Таким образом, полезная мощность конденсаторных двигателей в среднем составляет пример-

но 67%, а однофазных — 40% полезной мощности трехфазных двигателей того же габарита.

Коэффициент $\beta_2 = \frac{\eta_I \cos\varphi_I}{\eta_{III} \cos\varphi_{III}}$ для однофазных и конденсаторных двигателей может быть найден по кривым рис. 1-1 — 1-3.

$\eta_I \cos\varphi_I$ соответствует номинальной мощности проектируемой однофазной (или конденсаторной) машины; $\eta_{III} \cos\varphi_{III}$ — номинальной мощности эквивалентной ей трехфазной машины.

Кривые рис. 1-1—1-3 получены в результате обобщения данных по отечественным и иностранным микромашинам.

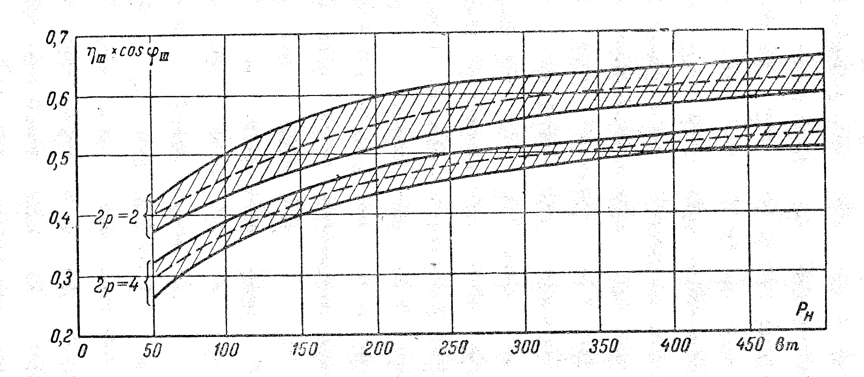


Рис. 1-1. Энергетический к. п. д. для трехфазных асинхронных микродвигателей $\eta_{III} \cos\varphi_{III} = f(P_н)$.

Следует отметить, что в отличие от трехфазных машин и однофазных машин с пусковыми элементами величины $\eta\cos\varphi$ для конденсаторных двигателей при $2p=2$ и $2p=4$ укладываются в общую зону (рис. 1-3). Верхний предел этой кривой относится преимущественно к четырехполюсным машинам; исключение составляет серия АОЛД (рис. 1-4), у которой произведение $\eta\cos\varphi$ выше для двухполюсных машин.

На рис. 1-4 приведены кривые $\eta\cos\varphi = f(P_н)$ для трехфазных и однофазных микродвигателей единой серии.

Известны различные попытки преобразовать уравнение (1-1) и ввести в него «машинную постоянную» или коэффициент использования, найденные по данным реально выполненных машин.

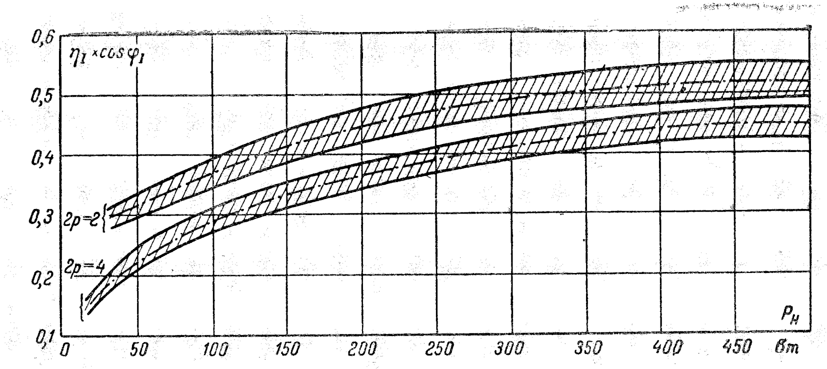


Рис. 1-2. Энергетический к. п. д. для однофазных асинхронных микродвигателей с пусковыми элементами ($r_п$ и $c_п$) $\eta_I \cos\varphi_I = f(P_н)$.

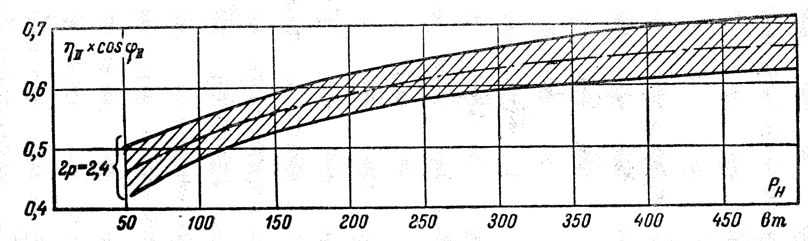


Рис. 1-3. Энергетический к. п. д. для асинхронных конденсаторных микродвигателей $\eta_{II} \cos\varphi_{II} = f(P_н)$.

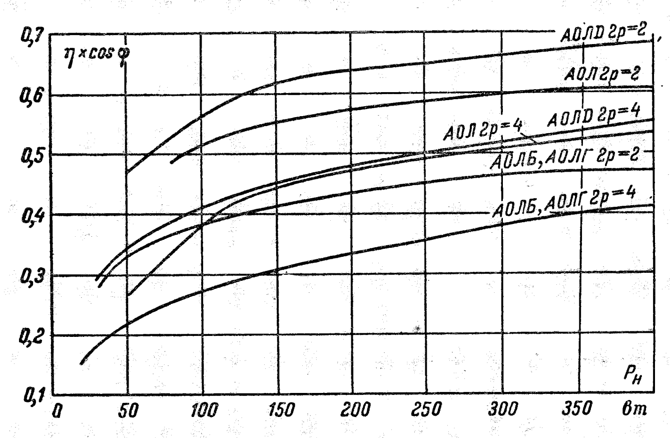


Рис. 1-4. Энергетический к. п. д. для асинхронных микродвигателей единой серии $\eta \cos\varphi = f(P_н)$.

Проф. Ю. С. Чечет [Л. 9] предложил пользоваться „машинной постоянной", которая отличается от постоянной Арнольда тем, что в знаменатель введены величины k_D^2 и $n_с$ (k_D — отношение внутреннего и наружного диаметров статора; $n_с$ — синхронная скорость вращения машины):

$$C = \frac{8{,}6 \cdot 10^8}{B_\delta A k_D^2 n_с} = \frac{D_а^2 l}{\beta_S P'_S}. \qquad (1\text{-}2)$$

Эта постоянная позволяет перейти в уравнении (1-1) от внутреннего диаметра статора D к наружному диамет-

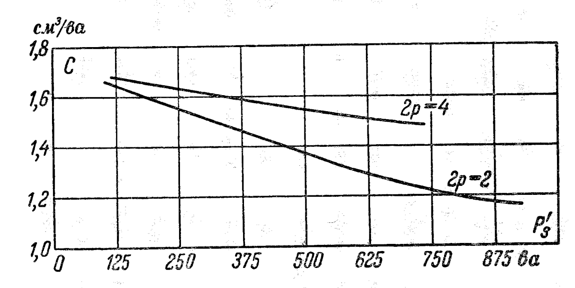


Рис. 1-5. „Машинная постоянная" $C = f(P_S)$, где

$$C = \frac{D_а^2 l}{\beta P'_S k_D^2} = \frac{8{,}6 \cdot 10^8}{B_\delta A n_с k_D^2}.$$

ру $D_а$, что является удобным, так как наружный диаметр статора выбирается с учетом оптимального раскроя стандартного листа стали (т. е. получения минимальных отходов).

Уравнение (1-1) принимает вид:

$$D_а^2 l = C \beta_S P'_S. \qquad (1\text{-}3)$$

В этой формуле C — „машинная постоянная" (*см³/ва*), одинаковая для всех типов двигателей — трехфазных, конденсаторных и с пусковыми элементами, а P'_S — расчетная мощность проектируемой машины (потребляемая из сети мощность, *ва*).

Как показывают расчеты двигателей единой серии, коэффициент β_S одинаков у всех однофазных машин и составляет для двухполюсных 1,55, для четырехполюсных — 1,35.

„Машинная постоянная" $C=f(P'_S)$ закрытых обдуваемых двигателей единой серии при $2p=2$ и $2p=4$ приведена на рис. 1-5. Она позволяет оценить данную серию по использованию и ориентировочно выбрать главные размеры машины.

На практике для оценки использования материалов в машине применяют так называемый коэффициент использования

$$k=\frac{P_н/n_с}{D^2l}\left[\frac{вт\cdot мин}{см^3\cdot об}\right], \quad (1\text{-}4)$$

где $P_н$ — номинальная мощность машины.

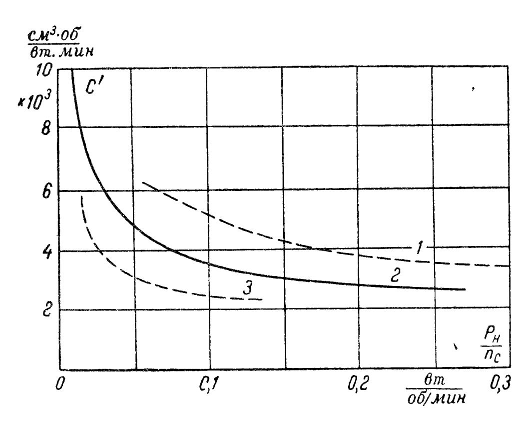


Рис. 1-6. „Машинная постоянная" C' для однофазных асинхронных микродвигателей с пусковыми элементами, где

$$C'=\frac{D^2l}{P_н/n_с}.$$

1 — американские; *2* — АОЛБ; *3* — фирмы Сименс.

Коэффициент использования имеет физический смысл. Он определяет момент на единицу объема, так как $\frac{P_н}{n_с}=1{,}028\cdot10^{-5}\ М\,[г\cdot см]$.

Величина, обратная коэффициенту использования, $\frac{1}{k}=C'$ представляет собой другую „машинную постоянную", которая характеризует объем машины на единицу момента:

$$C'=\frac{D^2l}{P_н/n_с}\left[\frac{см^3\cdot об}{вт\cdot мин}\right]. \quad (1\text{-}5)$$

Эта постоянная, естественно, имеет разные значения у трехфазных, конденсаторных и однофазных машин с пусковыми элементами.

На рис. 1-6 приведена кривая $C' = f\left(\frac{P_н}{n_с}\right)$ для однофазных двигателей с пусковыми элементами типа АОЛБ, а также для немецких и американских машин. Из сравнения

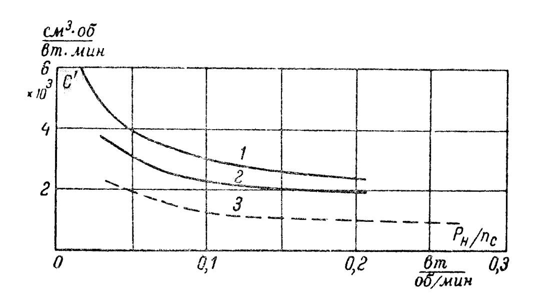


Рис. 1-7. „Машинная постоянная" C' для трехфазных и конденсаторных асинхронных микродвигателей, где

$$C' = \frac{D^2 l}{P_н / n_с}.$$

1 — АОЛД (конденсаторные); 2 — АОЛ (трехфазные); 3 — фирмы Сименс (трехфазные).

кривых видно, что американские машины имеют больший объем, чем отечественные и немецкие, т. е. они хуже использованы.

На рис. 1-7 приведена кривая $C' = f\left(\frac{P_н}{n_с}\right)$ для трехфазных и конденсаторных асинхронных микродвигателей.

1-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

Главные размеры микромашин (D и l) зависят от выбранных электромагнитных нагрузок, которые в свою очередь связаны с исполнением машины и системой охлаждения.

Основными электромагнитными нагрузками, как известно, являются:

а) для магнитной системы — индукция в воздушном зазоре B_δ;

б) для электрической части — линейная нагрузка A $a/см$ и плотность тока Δ $a/мм^2$.

Значения B_δ, A, Δ, во-первых, характеризуют использование магнитной системы и обмотки машины, а, во-вторых, от соотношения B_δ и A зависят ее рабочие и пусковые свойства.

Для машин малой мощности значения A и B_δ сравнительно невелики.

Индукция B_δ ограничивается допустимой индукцией в зубцах, которая для машин малой мощности меняется в довольно узких пределах.

Уменьшение линейной нагрузки для микродвигателей обусловлено прежде всего ухудшением заполнения паза. Это связано с тем, что в микромашинах полюсное деление τ мало, мал поток Φ и требуется относительно большое число проводов малого сечения; при этом изоляция проводов занимает значительное место. Таким образом, при выборе линейной нагрузки приходится считаться со значительным объемом изоляции в пазу и неравномерной укладкой в нем тонких проводов.

Следует отметить, что допустимая тепловая нагрузка W ($вт/см^2$) зависит главным образом от способа охлаждения машины и прямо пропорциональна линейной нагрузке и плотности тока:

$$W = \frac{\rho}{100} \Delta A, \qquad (1\text{-}6)$$

где ρ — удельное сопротивление проводникового материала.

С уменьшением линейной нагрузки A можно повысить плотность тока. Обычно в микромашинах плотность тока выше, чем в нормальных. Для m-фазной машины (в том числе и для симметричного конденсаторного двигателя) линейная нагрузка определяется по формуле

$$A_m = \frac{2mwI}{\pi D}. \qquad (1\text{-}7)$$

Для однофазной машины с пусковым элементом линейная нагрузка может быть определена как отношение ампер-проводов главной фазы к длине той части окружности, на которой расположены пазы, занимаемые этой фазой:

$$A_I = \frac{2w_A I_A}{a_{ZA}}, \qquad (1\text{-}8)$$

где $\alpha_{ZA} = \frac{\pi D Z_A}{Z_S}$ — длина дуги окружности, занимаемой пазами главной фазы.

В практике линейная нагрузка колеблется в следующих пределах:

для $2p = 2$ $A = 105 \div 125$ (реже — до 150) *а/см*;
для $2p = 4$ $A = 120 \div 165$ (реже — до 200) *а/см*.

Плотность тока выбирается в пределах $\Delta = 4$—10 *а/мм²*. Допустимая плотность тока для вспомогательных обмоток однофазных двигателей, включаемых на период пуска, превышает указанные пределы в 3—4, а иногда и до 6 раз.

Выбор величины индукции в воздушном зазоре для микродвигателей диктуется следующими соображениями:

1) допустимым насыщением зубцов и ярма статора (особенно у двухполюсных машин);

2) требованием получить наилучшие рабочие и пусковые характеристики;

3) требованием малошумности.

Второе соображение противоположно первому и третьему, так как требует увеличения B_δ.

В отличие от небольших пределов изменений линейной нагрузки (примерно 100—200 *а/см*) значения индукции в воздушном зазоре для микромашин могут изменяться в довольно широких пределах (3 000—8 000 *гс*) вследствие разнообразия технических требований и исполнений. Следует указать, что нижний предел B_δ относится к микромашинам меньшей мощности, а также к малошумным машинам.

При расчете микродвигателей единой серии (для обдуваемых машин) приняты индукции $B_\delta = 4\,500 \div 7\,500$ *гс*. Верхний предел близок к величине индукции у нормальных машин и и относится к четырехполюсным машинам.

На рис. 1-8 приведены зависимости B_δ, $A = f(\tau)$ для микродвигателей единой серии.

Если известна „машинная постоянная", то достаточно выбрать либо индукцию B_δ, либо линейную нагрузку A, определив неизвестную величину по формулам, полученным из уравнения (1-2), с подстановкой значений k_D и n_c соответственно для двух- и четырехполюсных машин:

для $2p = 2$

$$B_\delta = \frac{11{,}5 \cdot 10^5}{A \cdot C}; \qquad (1\text{-}9)$$

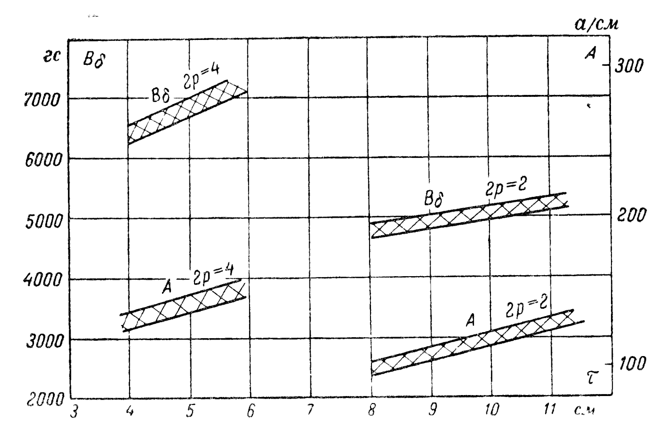


Рис. 1-8. Магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ и линейная нагрузка A для микродвигателей АОЛ единой серии в зависимости от полюсного деления.

для $2p=4$

$$B_\delta = \frac{16\cdot 10^5}{A\cdot C}, \tag{1-10}$$

где „машинная постоянная“ C определяется по кривой на рис. 1-5.

1-3. НАРУЖНЫЙ И ВНУТРЕННИЙ ДИАМЕТРЫ СТАТОРА, РАСЧЕТНАЯ ДЛИНА, ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР

Наружный диаметр статора

Для определения наружного диаметра статора можно воспользоваться уравнением (1-1), преобразовав его следующим образом:

$$\frac{D^2 l}{P'_S} = \frac{D_a^3\,\lambda\pi k_D^3 n_c}{P'_S 2p} = \frac{8{,}6\cdot 10^3}{B_\delta A}\beta_1\beta_2. \tag{1-11}$$

Из (1-11) наружный диаметр определится так:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{8{,}6\cdot 10^8 P'_S\beta_1\beta_2 2p}{\pi B_\delta A\lambda k_D^3 n_c}} =$$

$$= \frac{8{,}15}{k_D}\sqrt[3]{\frac{\beta_1\beta_2 P'_S p}{\frac{B_\delta}{1\,000}A\lambda\frac{n_c}{1\,000}}} = \frac{8{,}15}{k_D}\sqrt[3]{\frac{P'_{S\text{IIIэ}}\, p}{\frac{B_\delta}{1\,000}A\lambda\frac{n_c}{1\,000}}}\ \text{см}. \tag{1-12}$$

Здесь $P'_S = \frac{P_н}{\eta \cos \varphi}$ — потребляемая из сети кажущаяся мощность проектируемой машины, *ва*;

$P_н$ — номинальная полезная мощность проектируемой машины;

η, $\cos \varphi$ — к. п. д. и коэффициент мощности проектируемой машины;

$\lambda = \frac{l}{\tau}$ — отношение расчетной длины статора к полюсному делению;

$k_D = \frac{D}{D_а}$ — отношение внутреннего диаметра статора к его наружному диаметру;

B_δ — индукция в воздушном зазоре, *гс*;

A — линейная нагрузка, *а/см*.

Индукция и линейная нагрузка выбираются согласно § 1-2.

Отношение расчетной длины статора к полюсному делению колеблется в следующих пределах:

для $2p = 2$ $\lambda = 0,45 - 1,0$; $\lambda_{ср} = 0,75$;
для $2p = 4$ $\lambda = 0,8 - 1,4$; $\lambda_{ср} = 1,1$.

Если проектируется серия машин и на каждый диаметр берутся две длины, то следует брать наибольшее и наименьшее значения в указанных пределах.

Отношение внутреннего диаметра статора к его наружному диаметру у большинства существующих машин равно:

при $2p = 2$ $k_D = 0,5$;
при $2p = 4$ $k_D = 0,6$.

Так как коэффициент k_D для данного числа полюсов — величина постоянная, то формула для наружного диаметра двухполюсной машины примет более простой вид:

$$D_а = 11,25 \sqrt[3]{\frac{\beta_1 \beta_2 P'_S}{\frac{B_\delta}{1\,000} A\lambda}} = 11,25 \sqrt[3]{\frac{P'_{S\,IIIэ}}{\frac{B_\delta}{1\,000} A\lambda}} \text{ см.} \quad (1\text{-}13)$$

В формулах (1-12) и (1-13) расчетную мощность однофазной машины P'_S можно заменить расчетной мощностью эквивалентной трехфазной машины:

$$P'_{S\,IIIэ} = \beta_1 \beta_2 P'_S = \frac{\beta_1 P_н}{\eta_{III} \cos \varphi_{III}} = \frac{P_{нIIIэ}}{\eta_{III} \cos \varphi_{III}}, \quad (1\text{-}14)$$

где $\eta_{III}\cos\varphi_{III}$ берется для номинальной мощности эквивалентной трехфазной машины $P_{нIIIэ}$ из кривых на рис. 1-1, коэффициент $\beta_1 = 1{,}5$ — для конденсаторных машин и $\beta_1 = 2{,}5$ — для однофазных машин с пусковыми элементами.

Для четырехполюсных машин наружный диаметр статора определяется по формуле

$$D_а = 14{,}9\sqrt[3]{\frac{\beta_1\beta_2 P'_S}{\frac{B_\delta}{1\,000}A\lambda}} = 14{,}9\sqrt[3]{\frac{P'_{S\,IIIэ}}{\frac{B_\delta}{1\,000}A\lambda}}\ [см]. \quad (1\text{-}15)$$

В случае, если двухполюсные машины выполняются на одном штампе с четырехполюсными ($k_D = 0{,}6$), наружный диаметр статора в соответствии с формулой (1-12) определяется как

$$D_а = 9{,}38\sqrt[3]{\frac{P'_{S\,IIIэ}}{\frac{B_\delta}{1\,000}A\lambda}}\ [см]. \quad (1\text{-}16)$$

Полученный диаметр следует округлить до ближайшего значения, рекомендуемого по условию оптимального раскроя листа: 42, 50, 70, 78, 89, 102, 120, 145 *мм*.

Эти диаметры получаются при резке стандартного листа 750×1 500 *мм* на равные полосы с припуском на штамповку 5 *мм* на обе стороны.

При определении наружного диаметра по формулам (1-12), (1-13), (1-15) и (1-16) рекомендуется с помощью «машинных постоянных» C и C', рассчитанных по формулам (1-2) и (1-5), сравнить использование проектируемой машины с выполненными (рис. 1-5—1-7).

Наружный диаметр статора может быть найден также по «машинным постоянным» C или C'. Для этого приведем уравнение (1-3) к виду:

$$D_а^2\, l = \frac{D_а^3\lambda\pi k_D}{2p} = C\beta_S P'_S.$$

Наружный диаметр статора через „машинную постоянную“ C определяется как

$$D_а = \sqrt[3]{\frac{C\beta_S P'_S 2p}{\lambda\pi k_D}}\ [см], \quad (1\text{-}17)$$

где $P'_S = \frac{P_н}{\eta \cos\varphi}$; $\eta \cos\varphi$ берут из кривых рис. 1-2 (или рис. 1-3), а коэффициент β_S у однофазных и конденсаторных машин при $2p = 2$ равен 1,55, а при $2p = 4$ $\beta_S = 1{,}34$; C берут из кривой рис. 1-5. На основании уравнения (1-5) находим наружный диаметр статора по „машинной постоянной“ C':

$$D_а = \frac{1}{k_D} \sqrt[3]{\frac{C' P_н 2p}{\lambda \pi n_с}} \ [см]. \tag{1-18}$$

Наружный диаметр, найденный по формулам (1-17) и (1-18), округляется до ближайшего значения, рекомендованного по условию оптимального раскроя листа.

Внутренний диаметр статора

Внутренний диаметр статора определяется по выбранному коэффициенту k_D:

$$D = k_D D_а. \tag{1-19}$$

Для машин мощностью от $P_н = 10$ *вт* до $P_н = 100$ *вт* следует проверить выполнимость полученного внутреннего диаметра статора по выбранному числу зубцов статора из условий минимальной допустимой ширины зубца $b_Z = 1{,}8 \div 3$ *мм*, где низший предел относится к машинам меньшей мощности. Для этой цели можно воспользоваться формулой Т. Г. Амбарцумова, выведенной на основании метода модульных коэффициентов:

$$D = k_D D_а > 0{,}74 Z_S b_Z, \tag{1-20}$$

где Z_S — число зубцов статора (см. § 2-1);

b_Z — минимальная допустимая ширина зубца статора.

Формула (1-20) выведена в предположении, что индукция в зубце в 2,5 раза превышает индукцию в воздушном зазоре, а коэффициент заполнения сталью равен 0,93.

Полюсное деление и расчетная длина статора

Полюсное деление определяется из уравнения

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \ [см]. \tag{1-21}$$

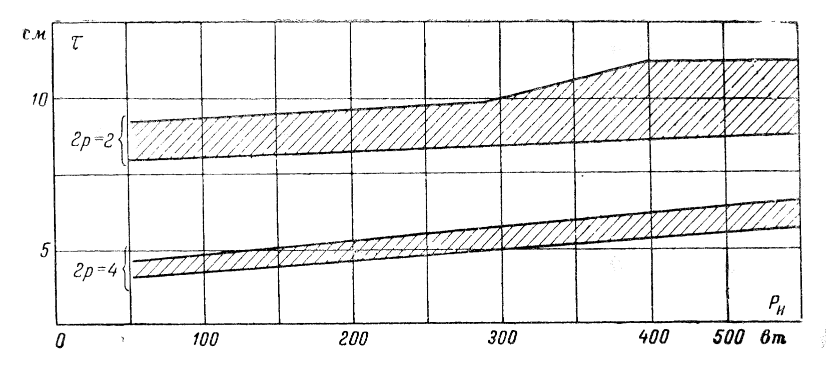


Рис. 1-9. Полюсные деления у трехфазных микродвигателей $\tau = f(P_н)$ при $2p = 2$ и $2p = 4$.

Следует отметить, что в нормальных машинах оптимальные значения полюсного деления τ уже установились. Для микромашин величина $\tau = f(P_н)$ сильно колеблется. Кривые $\tau = f(P_н)$ для трехфазных машин единой серии и иностранных фирм показаны на рис. 1-9.

Расчетная длина статора определяется как

$$l = \lambda\tau, \qquad (1\text{-}22)$$

где λ — отношение $\frac{l}{\tau}$, принятое при расчете наружного диаметра.

Так как машины одинаковой мощности различных исполнений имеют часто разные длины и, кроме того, в сериях обычно выполняются машины различных мощностей при одном диаметре и разных длинах (двух, трех), то в широком диапазоне мощностей 50—500 *вт* применяются полюсные деления τ, изменяющиеся в узких пределах:

для $2p = 2$ $\tau_{ср} = 8,5 \div 10$ *см*;
для $2p = 4$ $\tau_{ср} = 4,3 \div 6$ *см*.

Для однофазных двигателей с пусковыми элементами τ выбирают на 15—20% бо́льшим, чем для трехфазных. У конденсаторных двигателей выбирают τ таким же, как у трехфазных, или на 10—15% бо́льшим.

При дальнейшем расчете машины выбранные предварительно значения λ, а следовательно, и длины l, могут быть изменены по сравнению с первым вариантом. При этом надо иметь в виду, что так как наружный диаметр не ме-

няется, то в соответствии с уравнениями (1-13) и (1-15) должны быть несколько изменены электромагнитные нагрузки (B_δ и A).

Воздушный зазор

Воздушный зазор обычно выполняется минимальным для уменьшения тока холостого хода и улучшения коэффициента мощности $\cos\varphi$. Надо иметь в виду, что с уменьшением воздушного зазора стоимость изготовления машины увеличивается.

Воздушный зазор двигателей малой мощности обычно выбирается в пределах

$$\delta = 0{,}2 \div 0{,}45\ мм.$$

У однофазных двигателей для улучшения пусковых свойств воздушный зазор выбирают бо́льшим, чем у трехфазных, причем для $2p=2$ — бо́льшим, чем для $2p=4$.

В качестве примера можно привести величины воздушных зазоров в двигателях единой серии:

в трехфазных $\delta = 0{,}25$ *мм*;

в однофазных при $2p = 2$ и $P_н$ до 180 *вт* $\delta = 0{,}35$ *мм*.

Для трехфазных машин воздушный зазор может быть рассчитан для чисел полюсов $2p=2$, 4 и 6 по одной и той же эмпирической формуле

$$\delta = 0{,}2 + \frac{D}{900}\ [мм],$$

где D — внутренний диаметр статора, *мм*.

Для машин с дробным числом пазов на полюс и фазу q величину δ следует увеличить на 20%. В случае подшипников скольжения величину воздушного зазора следует также увеличить на 10—20% из-за возможного эксцентриситета.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОБМОТКА, ПАЗЫ И ЯРМО СТАТОРА

2-1. ВЫБОР ЧИСЛА ПАЗОВ СТАТОРА И РОТОРА

Выбор числа пазов на статоре Z_S для асинхронных микромашин тесно связан с выбором числа пазов на роторе.

Соотношение между Z_S и Z_R должно быть выбрано, исходя из следующих соображений:

1) отсутствие больших провалов в кривой $M=f(n)$,

обусловленных паразитными асинхронными и синхронными моментами (от тангенциальных сил);

2) минимальная шумность при работе двигателя, возникающая под действием радиальных сил;

3) минимальные добавочные потери в стали зубцов.

Кроме того, при заданном наружном диаметре статора выбор числа пазов Z_S ограничивается предельно допустимой по технологическим соображениям шириной зубца.

Наконец, выбор числа пазов статора при разных числах полюсов связан с типом обмотки (см. § 2-2).

Как известно [Л. 1 и 6], основные условия, обеспечивающие уменьшение вредного влияния паразитных тангенциальных и радиальных сил, можно сформулировать так:

Для снижения асинхронных паразитных моментов необходимо выбирать

$$Z_R \leqslant 1{,}25\,(Z_S + p).$$

Для снижения синхронных паразитных моментов при пуске и вращении двигателя должны быть соблюдены следующие неравенства:

а) При пуске

$$Z_R \neq Z_S;\quad Z_R \neq \frac{1}{2} Z_S;$$

$$Z_R \neq 2Z_S;\quad Z_R \neq 2mpg,$$

где g — любое положительное число.

б) При вращении двигателя

$$Z_R \neq 2mpg + 2p;$$

$$Z_R \neq Z_S + 2p;$$

$$Z_R \neq 2Z_S + 2p;$$

$$Z_R \neq \frac{1}{2} Z_S + p;$$

$$Z_R \neq Z_S + p.$$

Для того чтобы избежать появления радиальных сил, нужно соблюдать неравенства:

$$Z_R \neq 2mpg + 1;$$

$$Z_R \neq 2mpg + p + 1;$$

$$Z_R \neq 2mpg + 2p + 1.$$

Для асинхронных микродвигателей с короткозамкнутым ротором трехфазных и однофазных в отечественной и зарубежной практике применяются соотношения чисел пазов на статоре и роторе, указанные в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Соотношение чисел пазов статора и ротора

$2p$	z_S	z_R
2	18	21 (15, 22, 23, 30)
2	24	18 (17, 19, 22, 30, 36)
2	30	(36)
4	24	16, 22, 30 (17, 36)
4	32	26, 42 (44)
4	36	46 (48)
6	36	48
8	24	36
8	36	40

Примечание. В скобках указаны числа пазов, которые не удовлетворяют всем требованиям одновременно.

Следует отметить, что выбор благоприятного отношения $\frac{Z_S}{Z_R}$ с точки зрения учета указанных выше требований является до настоящего времени одной из важных задач исследований в области микромашин.

Наиболее употребительными числами пазов на статоре являются

$$Z_S = 18,\ 24 \text{ и } 36.$$

Таким образом, для распространенных в производстве трехфазных машин двухполюсного и четырехполюсного исполнений число пазов на полюс равно:

для $2p = 2$ $\quad q = 3;\ 4;\ 6;$

для $2p = 4$ $\quad q = 1\frac{1}{2},\ 2;\ 3.$

Следует избегать применения дробного числа пазов на полюс и фазу из-за усложнения изготовления обмотки, увеличения дифференциального рассеяния и др.

В однофазных двигателях число пазов на полюс в главной фазе обозначается Q_A, а во вспомогательной Q_B.

В конденсаторных двигателях главная и вспомогательная фазы занимают равные числа пазов, т. е. у них $Q_A = Q_B$. Та-

ким образом, при общем числе пазов на статоре $Z_S = 18$, 24 и 36:

$$\text{для } 2p=2 \quad Q_A = Q_B = \left(4\frac{1}{2}\right);\ 6;\ 9;$$

$$\text{для } 2p=4 \quad Q_A = Q_B = \left(2\frac{1}{4}\right);\ 3;\ \left(4\frac{1}{2}\right).$$

В однофазных двигателях с пусковыми элементами на главную фазу обычно отводится $^2/_3$, а на вспомогательную $^1/_3$ общего числа пазов.

Такое распределение пазов между фазами позволяет устранить третью гармонику в кривой н. с. главной фазы и целесообразно с точки зрения использования активных материалов.

Как известно, увеличение числа пазов главной фазы приводит к увеличению электрических потерь и затрат меди при неизменной плотности тока.

Встречаются, впрочем, хотя и значительно реже, двигатели с другим распределением пазов, например $^3/_4$ и $^1/_4$.

Поэтому в однофазных двигателях с пусковыми элементами $Q_A \neq Q_B$ и при тех же числах пазов на статоре $Z_S = 18$, 24 и 36 они составляют:

$$\text{для } 2p=2 \quad Q_A = 6;\ 8;\ 12;$$
$$Q_B = 3;\ 4;\ 6;$$
$$\text{для } 2p=4 \quad Q_A = 3;\ 4;\ 6;$$
$$Q_B = 1\frac{1}{2};\ 2;\ 3.$$

Микродвигатели единой серии нулевого габарита выполнены с числом пазов на статоре и роторе $\frac{Z_S}{Z_R} = \frac{18}{15}$, а первого, второго и при $2p=2$ третьего с соотношением $\frac{Z_S}{Z_R} = \frac{24}{18}$. Микродвигатели третьего габарита при $2p=4$ имеют $\frac{Z_S}{Z_R} = \frac{24}{20}$.

2-2. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ

Основные требования к обмоткам

К распределенным обмоткам статора предъявляется ряд требований, связанных с рабочими и особенно пусковыми свойствами машины, а также с технологией намотки.

В частности, получение благоприятной кривой пускового момента при разбеге $M=f(n)$ (без провалов) обусловливается главным образом правильным выбором соотношений чисел пазов статора и ротора, а также типом обмотки.

При проектировании трехфазных и однофазных обмоток следует уделять особое внимание уничтожению или по крайней мере ослаблению высших пространственных гармонических в кривой н. с., могущих вызвать настолько большие провалы в кривой момента $(M_{мин} < M_c)$ (рис. 2-1), что двигатель не сможет развернуться до номи-

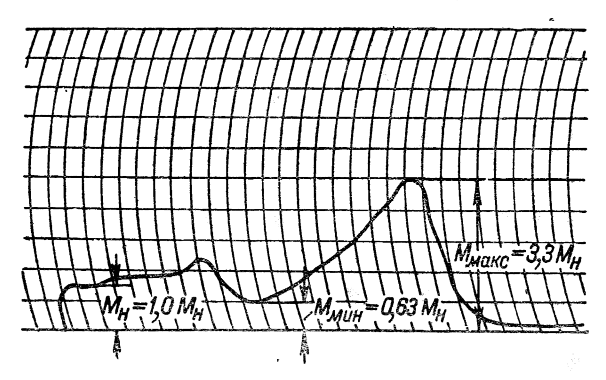


Рис. 2-1. Зависимость $M=f(t)$ однофазного двигателя с пусковым сопротивлением.

нальной скорости и «застрянет» на скорости, меньшей, чем номинальная. При этом возникает непосредственная угроза повреждения обмоток из-за длительного действия больших пусковых токов.

Особенно опасны высшие гармоники в кривой н. с. для однофазных двигателей с внесенным пусковым сопротивлением, имеющих повышенную плотность тока во вспомогательной обмотке.

На рис. 2-1 приведена кривая вращающих моментов однофазного асинхронного двигателя с пусковым сопротивлением (АОЛБ 22-2) $M=f(t)$, записанная на специальной установке. Из кривой видно, что в процессе разбега пусковой момент двигателя снижается до величины $M_{мин}$, меньшей момента сопротивления M_c. Провал в кривой момента (до $M_{мин}$) обусловлен третьей пространственной гар-

моникой в кривой н. с., которая для однофазных двигателей является наиболее опасной.

Нельзя не учитывать также, что правильный выбор однофазных распределенных обмоток связан с обязательным обеспечением не только эксплуатационных, но и конструктивно-технологических требований.

Прежде всего, особенно при серийном производстве однофазных микродвигателей, весьма важна простота выполнения обмоток. Процесс намотки удешевляется при меньших коэффициентах заполнения.

Кроме того, лучшее использование паза требует исключения дополнительной изоляции в пазу; например, в однослойных обмотках не требуются изоляционные прокладки между слоями.

Уменьшение вылета лобовых частей позволяет уменьшить осевые размеры машины и при этом снизить величину индуктивного сопротивления рассеяния.

Необходимо отметить, что удовлетворение эксплуатационных требований часто достигается ценой уступок конструктивно-технологическим требованиям.

Классификация обмоток

В соответствии с размещением катушечных сторон в пазу распределенные обмотки у асинхронных микродвигателей, так же как и у нормальных машин, разделяются на два основных класса:

1) однослойные,

2) двухслойные.

Однослойные обмотки в свою очередь различаются по форме катушек и размещению лобовых соединений. В микродвигателях могут быть выполнены однослойные обмотки с тремя типами катушек:

1) равносекционные цепные (рис. 2-2,*а*);

2) равносекционные корзиночные (рис. 2-3,*а* и *б*);

3) концентрические с катушками разной величины, главным образом двухплоскостные (рис. 2-2,*б* и 2-3,*в* и *г*).

Двухслойные обмотки асинхронных микродвигателей выполняются с укороченным шагом равносекционными, а однослойные обмотки — с укороченными катушками (рис. 2-3,*б* и *г*), но диаметральным шагом.

Однослойные и двухслойные обмотки применяются для трехфазных и однофазных двигателей.

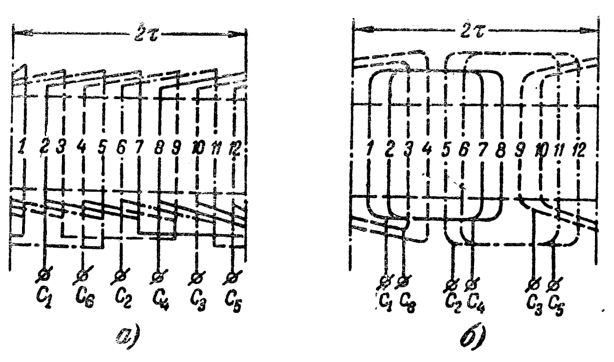


Рис. 2-2. Трехфазные однослойные обмотки при $Z_S = 12$; $m = 3$; $2p = 2$; $q = 2$.

а — цепная; *б* — концентрическая двухплоскостная.

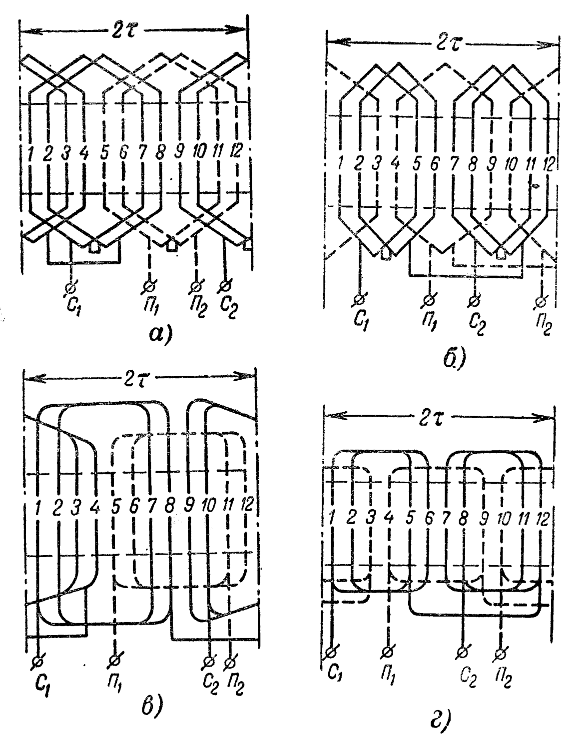


Рис. 2-3. Однофазные однослойные обмотки при $Z_S = 12$; $2p = 2$; $Q_A = 4$; $Q_B = 2$.

Равносекционная корзиночная: *а* — с диаметральным шагом; *б* — с укороченными катушками, концентрическая двухплоскостная; *в* — с диаметральным шагом; *г* — с укороченными катушками.

При исполнении трехфазных асинхронных двигателей универсальными, т. е. предназначенными для работы также и от однофазной сети в качестве конденсаторных и однофазных с пусковыми элементами, рекомендуется применение двухслойной обмотки с укороченным шагом для уменьшения влияния пространственной третьей гармоники магнитного потока на пусковые свойства двигателя.

В однофазных двигателях применяются также специальные обмотки.

К специальным обмоткам могут быть отнесены, например, «синусные» обмотки, которые являются обмотками высокой точности и в первую очередь применяются в асинхронных машинах для автоматических устройств, но они выполняются также и в машинах общего применения.

Название «синусные» эти обмотки получили потому, что вследствие определенного закона распределения проводников по пазам они (см. рис. 2-12 и 2-13) обеспечивают близкое к синусоидальному пространственное распределение н. с., а следовательно, и индукции в воздушном зазоре машины, при котором достигается уничтожение или значительное ослабление высших обмоточных гармоник (третьей, пятой и седьмой).

По форме катушек «синусные» обмотки подобны однослойным обмоткам с концентрическими катушками (см. рис. 2-12).

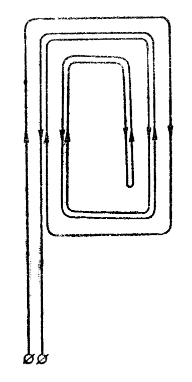


Рис. 2-4. Катушка с бифилярной обмоткой.

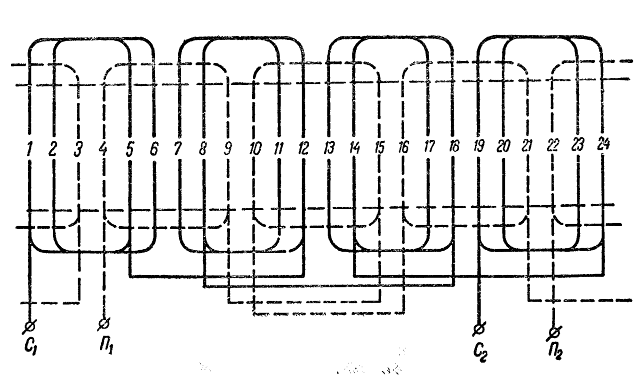


Рис. 2-5. Схема однослойной обмотки однофазного асинхронного двигателя с пусковым элементом при $Z_S = 24$; $2p = 4$; $Q_A = 4$; $Q_B = 2$.

$C_1 - C_2$ — главная (рабочая) фаза; $П_1 - П_2$ — вспомогательная (пусковая) фаза; имеет бифилярно намотанные витки.

В однофазных двигателях с повышенным сопротивлением пусковой фазы часть витков пусковой фазы, обеспечивающих требуемую величину пускового сопротивления, часто наматывается бифилярно (рис. 2-4). Эффективное число витков пусковой фазы не включает бифилярных витков и равно:

$$w_{\text{э в}} = w_{\text{в}} - w_{\text{в биф}},$$

где $w_{\text{в}}$ — общее число витков пусковой фазы;

$w_{\text{в биф}}$ — число витков фазы, намотанных бифилярно.

Форма катушек бифилярной обмотки такая же, как однослойной обмотки. На рис. 2-5 приведена схема обмотки двигателя единой серии АОЛБ 11/4 с бифилярной пусковой обмоткой.

Схемы обмоток однофазных двигателей

В однофазных двигателях с отключаемой после пуска вспомогательной фазой применяются однослойные и двухслойные обмотки. На главную обмотку обычно отводится $^2/_3$ пазов, а на вспомогательную — $^1/_3$ пазов.

В конденсаторных двигателях, у которых вспомогательная обмотка остается подключенной к сети также и во время работы, пазы статора целесообразно делить поровну между обеими обмотками. При сравнительной простоте технологии изготовления и лучшем заполнении паза (отсутствие изоляционной прокладки) по сравнению с двухслойными обмотками однослойные обмотки обладают тем недостатком, что они создают в кривой н. с. сильно выраженные пространственные гармоники.

Двухслойные обмотки позволяют с помощью укорочения шага на $^1/_3$ полюсного деления полностью уничтожить третью гармонику в кривой н. с. как в главной, так и во вспомогательной обмотках. В однослойных обмотках третья гармоника в кривой н. с. главной фазы уничтожается автоматически вследствие распределения последней в $^2/_3$ общего числа пазов. Зато во вспомогательной обмотке амплитуда н. с. третьей гармоники достигает 25% амплитуды первой гармоники. Другие высшие гармоники (пятая, седьмая и т. д.) также выражены особенно сильно у однослойных обмоток.

При «синусных» обмотках в однофазном асинхронном микродвигателе с пусковым элементом нет нужды в делении пазов между главной и вспомогательной обмотками

в отношении 2:1. У этих обмоток проводники обеих фаз в соответствии с избранным законом распределяются по всем пазам на окружности статора.

В качестве одного из примеров на рис. 2-6 приведена схема-развертка однослойной обмотки с укороченными катушками однофазного двигателя единой серии с повышенным сопротивлением в пусковой фазе АОЛБ 11/4 при $Z_S = 24$, $2p = 4$, $Q_A = 4$, $Q_B = 2$. В пусковой фазе часть витков намотана бифилярно.

Для такой обмотки коэффициент укорочения обеих фаз $k_у = 1$, т. е. обмотка является диаметральной, хотя и имеет укороченные катушки.

Общим признаком диаметральности однослойной обмотки является размещение в пределах фазной зоны q пазов, принадлежащих одной фазе.

Принцип образования однослойной обмотки и определение влияния укорочения могут быть наглядно представлены с помощью так называемой звезды пазовых э. д. с.

На рис. 2-6—2-8 дано распределение пазов между фазами, построены звезда пазовых э. д. с. и векторная диаграмма для определения обмоточного коэффициента однослойной обмотки при $Z_S = 24$ и $2p = 4$ для двух случаев: а) обмотки без укорочения ($k_у = 1$) и б) обмотки с укорочением.

Из рисунков видно, что там, где в фазной зоне пазы принадлежат только одной фазе, укорочения нет, коэффи-

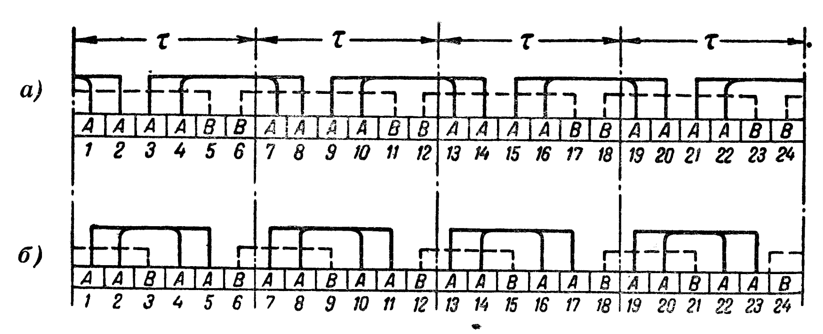


Рис. 2-6. Схема торцовых соединений однослойной обмотки при $Z_S = 24$; $2p = 4$; $Q_A = 4$; $Q_B = 2$.

а — с укороченными катушками ($k_у = 1$), *б* — с укорочением $\left(k_у = \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$.

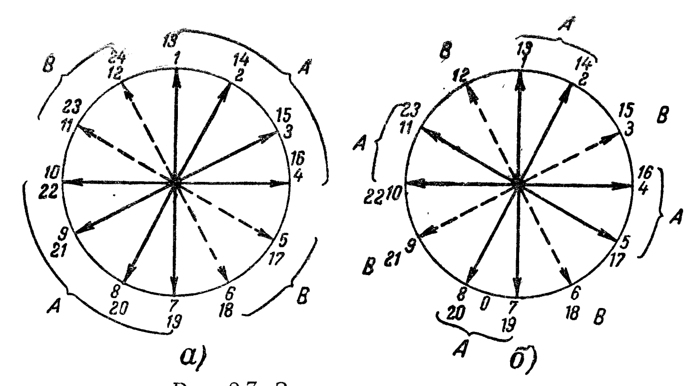


Рис. 2-7. Звезда пазовых э. д. с.

а — обмотки с укороченными катушками (см. рис. 2-6, *а*); *б* — обмотки с укорочением (рис. 2-6, *б*).

циент $k_у = 1$, хотя катушки имеют укороченные лобовые части.

Для случая, когда в фазной зоне пазы принадлежат разным фазам, обмоточный коэффициент уменьшается за счет укорочения шага (в нашем примере—от $k_{01} = 0{,}838$ до $k'_{01} = 0{,}672$).

На рис. 2-9 приведена схема-развертка двухслойной обмотки, выполненной для однофазного двигателя с повышенным сопротивлением в пусковой фазе при том же числе пазов статора $Z_S = 24$ и числе полюсов $2p = 4$, что и у двигателя АОЛБ 11/4.

Часто схемы обмоток изображаются с расположением катушек по окружности статора. На рис. 2-10 приведена такого вида схема однослойной обмотки с укороченными катушками для однофазного двигателя единой серии с повышенным сопротивлением в пусковой фазе АОЛБО 11/2

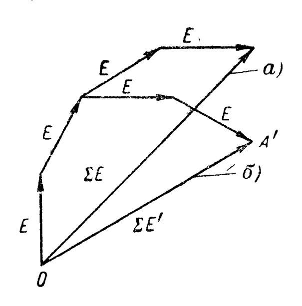


Рис. 2-8. Векторные диаграммы пазовых э. д. с. к определению обмоточных коэффициентов.

а — обмотки с укороченными катушками (рис. 2-6, *а*). $k_{01} = \frac{\Sigma E}{4E} = 0{,}838$; *б* — обмотки с укорочением (рис. 2-6, *б*); $k'_{01} = \frac{\Sigma E'}{4E} = 0{,}672$.

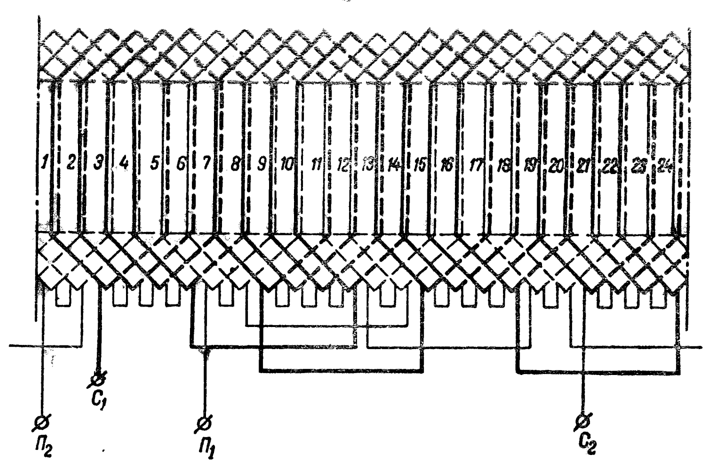


Рис. 2-9. Схема двухслойной обмотки однофазного асинхронного двигателя с пусковым элементом при $Z_S = 24$; $2p = 4$; $Q_A = 4$; $Q_B = 2$; C_1, C_2 — главная фаза; $П_1$, $П_2$ — вспомогательная фаза.

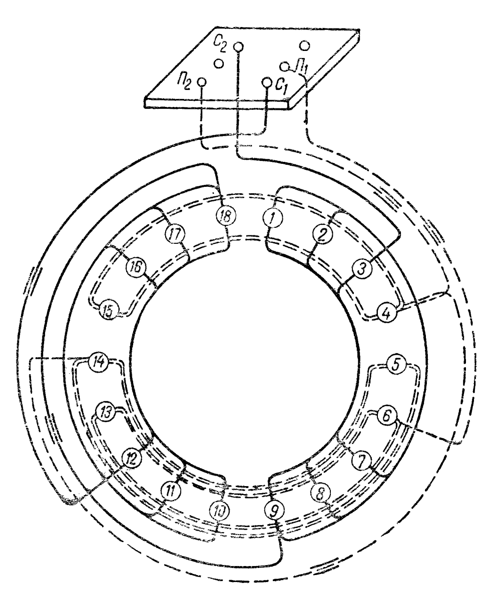


Рис. 2-10. Схема однослойной обмотки однофазного асинхронного двигателя с пусковым элементом при $Z_S = 18$; $2p = 2$; $Q_A = 6$; $Q_B = 3$.

при $Z_S = 18$, $2p = 2$, $Q_A = 6$, $Q_B = 3$, а на рис. 2-11—схема однослойной обмотки с укороченными катушками для конденсаторного двигателя единой серии АОЛД 11/4 при $Z_S = 24$, $2p = 4$, $Q_A = Q_B = 3$. Характерной особенностью обмотки на рис. 2-11 является наличие четырех „расчесанных" катушек (с половинным числом витков в каждой) в обеих фазах. Такие обмотки называются также обмот-

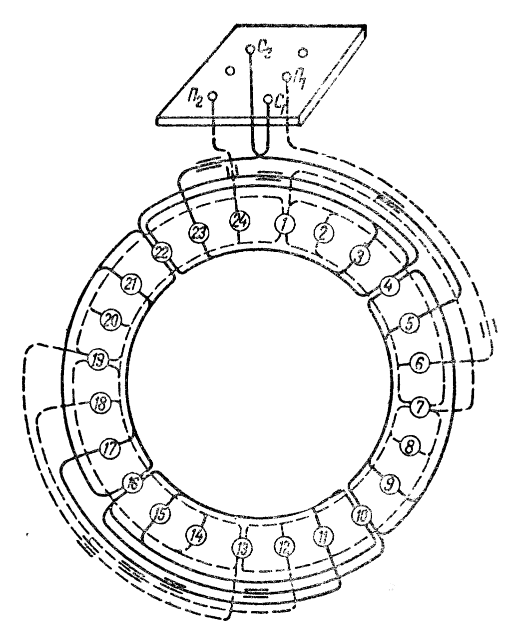
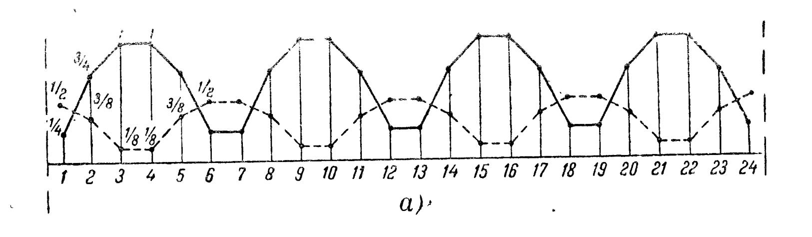


Рис. 2-11. Схема однослойной обмотки однофазного конденсаторного двигателя при $Z_S = 24$; $2p = 4$; $Q_A = Q_B = 3$.

ками с разделенными группами катушек; они имеют число групп (катушек), равное числу полюсов.

На рис. 2-12 дана схема-развертка «синусной» обмотки для однофазного двигателя с повышенным сопротивлением в пусковой фазе при $Z_S = 24$ и $2p = 4$ и показано распределение проводников по пазам в относительных единицах. За единицу принято наибольшее число проводников в главной фазе.

По своему исполнению «синусные» обмотки сочетают основные черты однослойных и двухслойных обмоток



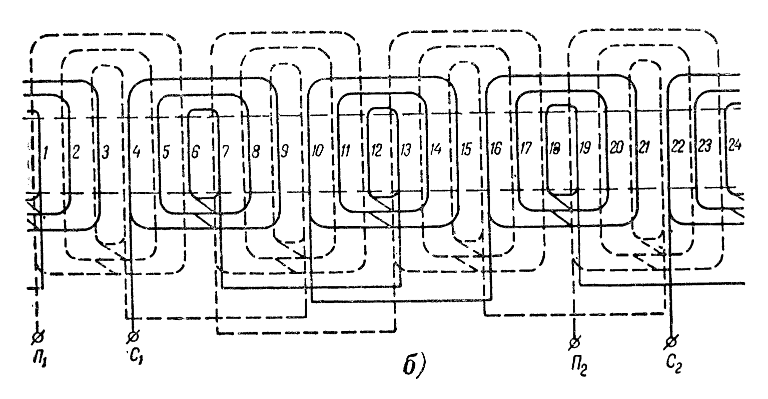


Рис. 2-12. Синусная обмотка однофазного асинхронного микродвигателя с пусковым элементом при $Z_S = 24$; $2p = 4$.

а — график распределения проводников по пазам; *б* — схема обмотки; ——— — главная фаза; — — — — вспомогательная фаза.

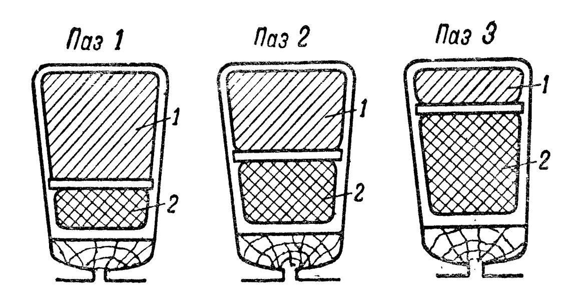


Рис. 2-13. Заполнение пазов проводниками при неравновитковых катушках.

1 — катушки главной фазы; *2* — катушки вспомогательной фазы.

обычного типа. Они выполняются в виде катушек (с различным числом витков) как однослойные обмотки, но в пазу располагаются две секционные стороны, как у двухслойных обмоток, и эти секционные стороны принадлежат катушкам разных фаз (рис. 2-13).

Технологическое преимущество «синусных» обмоток заключается в том, что все катушки каждой из фаз можно расположить только в одном из слоев. Тогда пусковую фазу располагают в верхнем слое, что облегчает перемотку ее при ремонте.

Известную технологическую трудность представляет изготовление катушек с различным числом витков. Но эта трудность вполне оправдывается получением лучшей формы кривой поля.

2-3. РАСЧЕТ ОБМОТОК СТАТОРА

Обмоточный коэффициент

Как известно, обмоточный коэффициент распределенной обмотки первой гармоники

$$k_{о1} = k_{р1} k_{у1}, \tag{2-1}$$

где $k_{о1}$ — обмоточный коэффициент для первой гармоники;

$k_{р1}$ — коэффициент распределения первой гармоники;

$k_{у1}$ — коэффициент укорочения первой гармоники.

Общая формула обмоточного коэффициента $k_{о1}$ для многофазной симметричной обмотки с любым числом пазов на полюс и фазу (целым и дробным) при $m \geqslant 2$ имеет вид:

$$k_{о1} = k_{р1} k_{у1} = \frac{\sin \frac{\pi}{k_{зон} m}}{c \sin \frac{\pi}{k_{зон} mc}} \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right), \tag{2-2}$$

где m — число фаз обмотки;

c — числитель несократимой дроби $\frac{c}{d} = \frac{k_{сл}}{k_{зон}} q$, в которой c и d — целые числа;

$q = \frac{Z_S}{2pm}$ — число пазов на полюс и фазу;

$k_{сл}$ — коэффициент, учитывающий число слоев обмотки: для двухслойной обмотки $k_{сл}=2$; для однослойной обмотки $k_{сл}=1$;

$k_{зон}$ — коэффициент, зависящий от числа зон обмотки: для трехфазной обмотки, где число зон $2m=6$ $\left(\text{зона } \frac{\pi}{m}=60^\circ\right)$, $k_{зон}=2$;

для двухфазной обмотки, где число зон $2m=4$ $\left(\text{зона } \frac{\pi}{m}=90^\circ\right)$, $k_{зон}=2$;

$\beta=\frac{2py}{Z_S}$ — шаг обмотки в долях полюсного деления.

Общая формула обмоточного коэффициента (2-2) $2m$-зонных обмоток для различных частных случаев может быть упрощена.

Для трехфазной обмотки с укороченным шагом

$$k_{o1}=\frac{0,5}{c\sin\frac{30^\circ}{c}}\sin\left(\beta\frac{\pi}{2}\right), \tag{2-3}$$

где c определяется из условий:

для двухслойной обмотки $q=\frac{c}{d}$;

для однослойной обмотки $\frac{q}{2}=\frac{c}{d}$;

$\frac{c}{d}$ — несократимая дробь (c и d — целые числа).

Коэффициент распределения

$$k_{p1}=\frac{0,5}{c\sin\frac{30^\circ}{c}}. \tag{2-4}$$

Значения коэффициента k_{p1} приведены в табл. 2-2.

Таблица 2-2

Коэффициент распределения k_{p1} для трехфазной обмотки

c	1	2	3	4	5	6	7
k_{p1}	1,00	0,965	0,960	0,958	0,957	0,956	0,955

Для трехфазной однослойной обмотки с диаметральным шагом

$$k_{o1}=\frac{0,5}{q\sin\frac{30^\circ}{q}}. \tag{2-5}$$

Значения обмоточного коэффициента можно определять по табл. 2-2, принимая $c = q$.

Для двухфазной обмотки с укороченным шагом

$$k_{01} = \frac{0,707}{c \sin \frac{45°}{c}} \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right); \tag{2-6}$$

c определяется из условий:

для двухслойной обмотки $q = \frac{c}{d}$;

для однослойной обмотки $\frac{q}{2} = \frac{c}{d}$;

$\frac{c}{d}$ — несократимая дробь (c и d — целые числа).

Для двухфазной однослойной обмотки с диаметральным шагом

$$k_{01} = \frac{0,707}{q \sin \frac{45°}{q}}. \tag{2-7}$$

Для однофазных двигателей с пусковыми элементами обмоточные коэффициенты следует рассчитывать для каждой из фаз в отдельности по следующим формулам:

Для однофазной двухслойной обмотки с укороченным шагом

$$k_{01} = \frac{\sin \frac{\pi p Q'}{Z_S}}{Q' \sin \frac{\pi p}{Z_S}} \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right), \tag{2-8}$$

где Q' — число секций на полюс; для двухслойной обмотки Q' равно числу пазов данной фазы на полюс.

Формула применима при условиях: $\frac{Z_S}{2p}$ — целое число; Q' — целое число

Для однофазной однослойной обмотки (равносекционной) с укороченным шагом

$$k_{01} = \frac{\sin \frac{2\pi p Q'}{Z_S}}{Q' \sin \frac{2\pi p}{Z_S}} \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right), \tag{2-9}$$

где Q' — число секций на полюс.

Формула применима при условиях: $\frac{Z_S}{4p}$ — целое число; Q' — целое число.

Для однофазной однослойной обмотки с диаметральным шагом

$$k_{o1} = \frac{\sin \frac{\pi p Q}{Z_S}}{Q \sin \frac{\pi p}{Z_S}}, \qquad (2\text{-}10)$$

где Q — число пазов на полюс, занятых фазой.

Формула применима при условии $\frac{Z_S}{2p}$ — целое число; Q — целое число.

Число витков фазы

Число витков фазы трехфазного двигателя или число витков главной фазы однофазного двигателя, включая конденсаторный, может быть определено по известной формуле для э. д. с., наведенной в обмотке статора:

$$w_S = \frac{U_н k_E \cdot 10^8}{4 k_B f \Phi k_{o1}}, \qquad (2\text{-}11)$$

где

$$k_E = \frac{E_н}{U_н} = \frac{|\dot{U}_н - \dot{I}_н Z_S|}{|\dot{U}_н|}; \qquad (2\text{-}12)$$

$E_н$ — фазная э. д. с.;
$U_н$ — фазное напряжение;
$I_н$ — фазный номинальный ток;
k_B — коэффициент формы поля;
Φ — магнитный поток в воздушном зазоре;
k_{o1} — обмоточный коэффициент первой гармоники;
Z_S — полное сопротивление обмотки статора.

Величина коэффициента k_E у микродвигателей меньше, чем у нормальных асинхронных машин, и лежит в пределах 0,7—0,9, так как падение напряжения у них больше. Кроме того, следует учитывать, что у микродвигателей $IZ_S \neq Ix_S$, поскольку активное сопротивление r_S не может быть принято равным нулю; оно соизмеримо с индуктивным сопротивлением x_S обмотки статора. Влияние активного сопротивления

r_S тем больше, чем меньше мощность машины. У машин очень малой мощности $r_S > x_S$.

При расчете числа витков w_S коэффициентом k_E следует задаваться в пределах 0,7—0,9, где меньшие величины относятся к машинам меньшей мощности.

Величина коэффициента k_E проверяется после нахождения сопротивлений обмотки статора r_S и x_S.

Для этой цели строится векторная диаграмма, приведенная на рис. 2-14. Векторная диаграмма строится для номинального режима, для которого ток рассчитывается по формулам (2-17) и (2-18), а $\cos\varphi$ берется из кривых $\cos\varphi = f(P_н)$ на рис. 2-15—2-17.

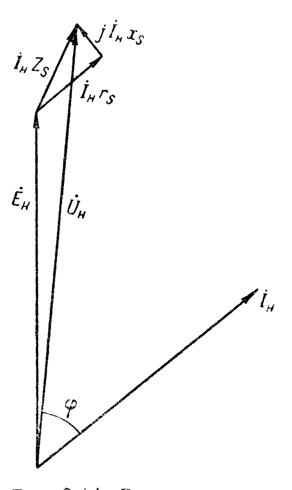


Рис 2-14. Векторная диаграмма для определения k_E, где $k_E = \frac{E_н}{U_н}$.

Если k_E, полученное по векторной диаграмме, значительно отличается от предварительно выбранного, то следует сделать пересчет числа витков обмотки статора при новом значении k_E, взятом из векторной диаграммы.

Окончательное значение k_E определяется при расчете рабочих характеристик; оно должно быть близким к принятому.

В микромашинах значения коэффициента k_E для различных режимов (от холостого хода до короткого замыкания) несколько отличаются между собой, что может сказаться на величине сопротивления x_m, соответствующего потоку в воздушном зазоре. Особенно резко это влияние проявляется в машинах меньшей мощности, где иногда следует пересчитать параметр x_m в соответствии с новым значением k_E в режиме короткого замыкания.

Коэффициент формы поля k_B выбирают в зависимости от насыщения машины.

Зависимость коэффициента k_B от коэффициента насыщения $k_B = f(k_Z)$ приведена на рис. 2-18. При небольших коэффициентах насыщения, которые имеют место в микромашинах, можно принять в среднем $k_B = 1{,}06 \div 1{,}1$.

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi = \alpha_\delta \tau l B_\delta, \qquad (2\text{-}13)$$

где α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; он зависит главным образом от насыщения зубцов статора

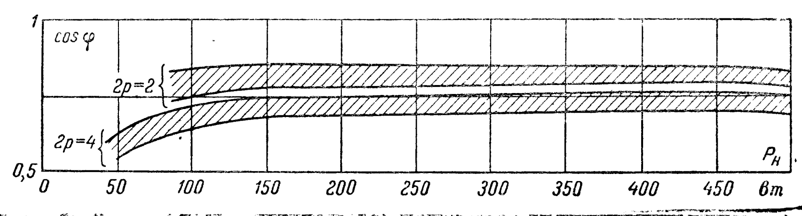


Рис. 2-15. cos φ трехфазных асинхронных микродвигателей в зависимости от номинальной мощности.

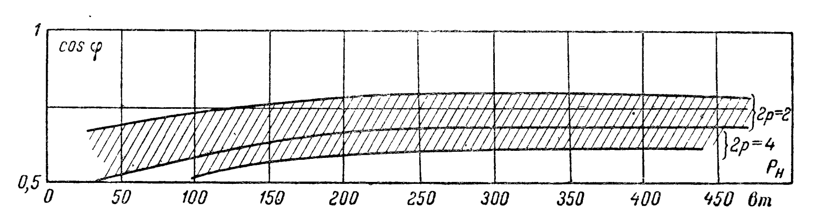


Рис. 2-16. cos φ однофазных асинхронных микродвигателей с пусковыми элементами в зависимости от номинальной мощности.

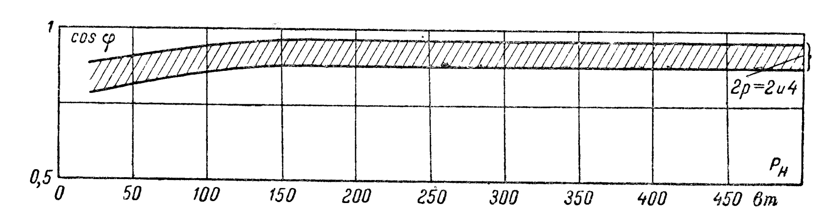


Рис. 2-17. cos φ конденсаторных асинхронных микродвигателей в зависимости от номинальной мощности.

и ротора. На рис. 2-18 приведена кривая $\alpha_\delta = f(k_Z)$. В современных машинах малой мощности коэффициент насыщения $k_Z = 1{,}1 \div 1{,}5$ и $\alpha_\delta = 0{,}66 \div 0{,}73$. При расчете магнитного потока величиной α_δ предварительно задаются, а затем уточняют ее после расчета магнитной цепи.

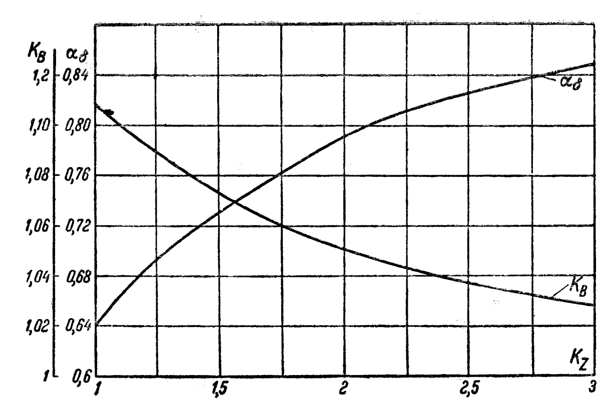


Рис. 2-18. Кривые $\alpha_\delta = f(k_z)$ и $k_B = f(k_z)$ для асинхронных двигателей.

Число проводников и сечение меди в пазу

У трехфазных ($m = 3$) и двухфазных ($m = 2$) двигателей (с равным числом пазов в каждой фазе) число проводников следует подсчитывать по формуле

$$u_п = \frac{2mw_S a}{Z_S} = \frac{w_S a}{pq} \quad (2\text{-}14)$$

У однофазных двигателей, где главная обмотка занимает обычно $^2/_3$ пазов,

$$u_п = \frac{3w_S a}{Z_S} = \frac{w_S a}{pQ} \quad (2\text{-}15)$$

Сечение провода обмотки статора (для однофазных двигателей—у главной фазы) рассчитывается по формуле

$$S'_S = \frac{I_н}{a\Delta_S} \quad (2\text{-}16)$$

где $I_н$ — номинальный фазный ток;

Δ_S — плотность тока;

a — число параллельных ветвей.

Номинальный фазный ток для трехфазных и однофазных двигателей предварительно может быть найден по расчетной мощности P'_S:

$$I_н = \frac{P'_S}{mU_н} \quad (2\text{-}17)$$

Для конденсаторного двигателя также рассчитывается ток в главной фазе. При этом двигатель вначале рассматривается как симметричный двухфазный, для которого фазный ток

$$I_н = \frac{P'_S}{\sqrt{2}U_н} \qquad (2\text{-}18)$$

Плотность тока может быть выбрана в пределах $\Delta_S = 4 \div 10$ *а/мм²*. Верхний предел относится к машинам меньшей мощности.

В конденсаторных двигателях, рассчитываемых вначале как симметричные двухфазные машины, плотность тока предварительно выбирается по низшему пределу, так как расчетный ток в общем случае отличается от действительного вследствие иного распределения токов между главной и вспомогательной фазами при питании от однофазной сети. Действительная плотность тока в дальнейшем проверяется при расчете рабочих характеристик.

Для обмоток асинхронных микродвигателей применяются обмоточные провода марки ПЭВ-2 для всех диаметров, ПЭЛШО — до диаметра 0,35 *мм*, ПЭЛБО — для диаметров свыше 0,35 *мм* (см. приложение 3). По сечению s'_S выбираются диаметр проводника и его марка.

Полученное сечение проводника s'_S округляется до ближайшего стандартного сечения s'_S (см. приложение 2).

Сечение меди в пазу

$$S_{мS} = S_S u_п \qquad (2\text{-}19)$$

2-4. РАСЧЕТ «СИНУСНОЙ» ОБМОТКИ

В настоящем параграфе рассматриваются основные вопросы теории и расчета «синусных» обмоток для однофазных двигателей общего применения [Л. 15].

Как известно, назначение «синусной» обмотки состоит в том, чтобы при соответствующем распределении проводников по пазам получить кривую н. с. $F_x = f(x)$, близкую к синусоидальной.

Следует отметить, что «синусные» обмотки позволяют полностью уничтожить третью гармонику и при этом ослабить гармоники высшего порядка (пятую, седьмую и т. д.) в большей степени, чем двухслойные обмотки.

Для выполнения этого требования кривая распределения проводников по пазам $u_{пx} = \varphi(x)$ ($u_{пx}$ — число проводников в пазу) должна иметь форму криволинейного графика (рис. 2-19). Распределение проводников по пазам может быть осуществлено в виде неполного прямоугольника, тре-

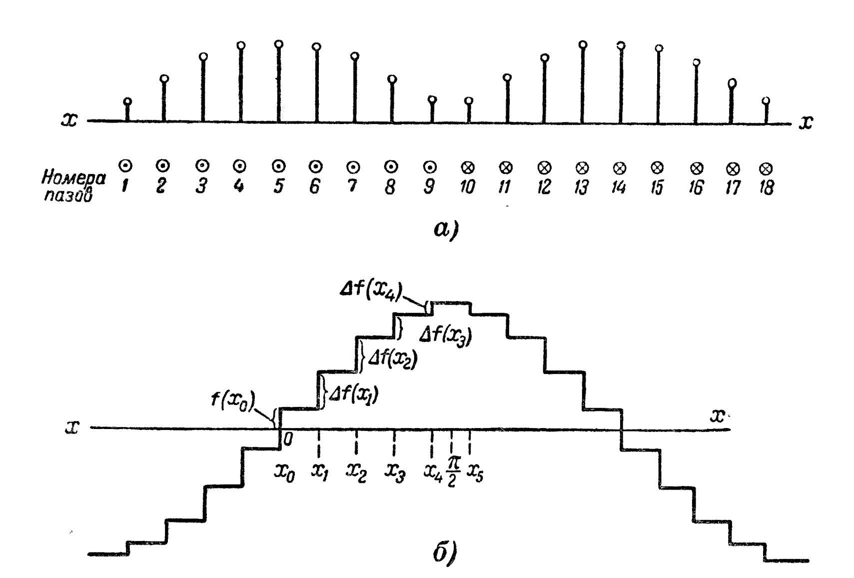


Рис. 2-19. Кривая н. с. синусной обмотки при выбранном распределении проводников.

а — распределение проводников по пазам $u_{пx} = \varphi(x)$; *б* — график н. с. $F_x = f(x)$.

угольника, трапеции и т. п. Как видно из рис. 2-19, где в качестве примера рассматривается распределение проводников по пазам в виде криволинейной трапеции, кривая н. с. имеет ступенчатый характер.

Специфическим в расчете «синусной» обмотки являются определение обмоточного коэффициента и выбор оптимального распределения проводников по пазам.

Обмоточный коэффициент

Для „синусной" обмотки обмоточный коэффициент целесообразно определять как отношение амплитуды н. с. ν-й гармоники при выбранном распределении проводников по

пазам $u_{пx} = \varphi(x)$ (рис. 2-19) к амплитуде $F_{mc\nu}$ той же гармоники при так называемом „сосредоточенном" распределении проводников (рис. 2-20):

$$k_{o\nu} = \frac{F_{m\nu}}{F_{mc\nu}}. \qquad (2\text{-}20)$$

Под сосредоточенным или однокатушечным распределением проводников $u_{пс} = \varphi_с(x)$ следует понимать такое распределение, когда часть обмотки на двух полюсных делениях 2τ представляет одну катушку, лежащую в двух пазах и имеющую ширину, равную полюсному делению.

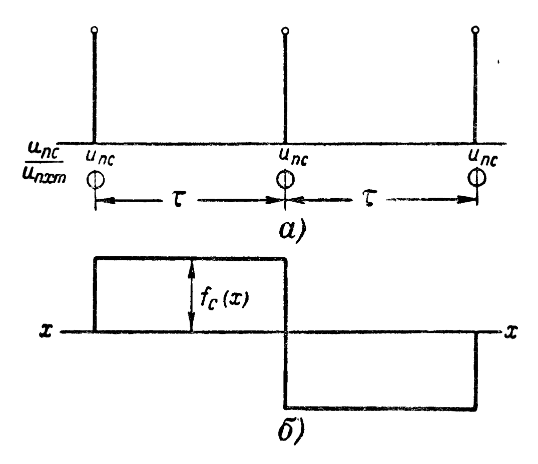


Рис. 2-20. График н. с. при сосредоточенном распределении проводников.

а — распределение проводников по пазам $u_{пс} = \varphi(x)$; *б* — график н. с. $F_с = f(x)$.

Амплитуда ν-й гармоники ступенчатой кривой н. с.

$$F_{m\nu} = \frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x)\sin\nu x\,dx. \qquad (2\text{-}21)$$

Поскольку кривые н. с. при „синусных" обмотках являются симметричными, можно брать пределы интегрирования от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

У симметричной кривой н. с. выражение для амплитуды ν-й гармоники может быть записано в следующем виде:

$$F_{m\nu}=\frac{4}{\nu\pi}\left[f(x_0)+\Sigma\Delta f(x_n)\cos\nu x_n\right]. \qquad (2\text{-}22)$$

Здесь $x_0=0$ — начало отсчета в кривой н. с. (рис. 2-19), соответствующее точке перехода кривой через нуль, а абсцисса x_n изменяется в пределах $0\div\frac{\pi}{2}$:

$$0<x_n<\frac{\pi}{2}.$$

Приращения ординат в любой точке кривой н. с.

$$\Delta f(x_n)=f(x_n)-f(x_{n-1}). \qquad (2\text{-}23)$$

Соответствующие этим приращениям значения абсциссы x могут быть найдены по графику для н. с.

При сосредоточенном распределении проводников пространственный график для н. с. представляет собой прямоугольник высотой $f_c(x)$ (рис. 2-20):

$$f_c(x)=\sum_0^{\frac{\pi}{2}}\Delta f(x). \qquad (2\text{-}24)$$

Амплитуда ν-й гармоники при сосредоточенном распределении

$$F_{mc\nu}=\frac{4}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}f_c(x)\sin\nu x\,dx=\frac{4}{\pi\nu}f_c(x). \qquad (2\text{-}25)$$

Таким образом, обмоточный коэффициент для синусной обмотки в общем виде выразится формулой

$$k_{o\nu}=\frac{F_{m\nu}}{F_{mc\nu}}=\frac{f(x_0)+\Sigma\Delta f(x_n)\cos\nu x_n}{f_c(x)}. \qquad (2\text{-}26)$$

Выбор распределения проводников по пазам

В табл. 2-3 приведены значения полюсных делений τ_Z, выраженные в пазах, при различных сочетаниях чисел пазов статора Z_S и полюсов $2p$.

Значение τ_z (в пазах) при раз

z_S	10	12	14	16	18	20	22	24	26
$2p = 2$	5	**6**	7	8	**9**	10	11	**12**	13
$2p = 4$	—	3	—	4	—	5	—	**6**	—
$2p = 6$	—	2	—	—	3	—	—	4	—
$2p = 8$	—	—	—	2	—	—	—	3	—

Так как обязательным условием выполнимости распределенных „синусных" обмоток должно быть целое τ_Z, в таблице приведены только четные числа пазов. Таблица охватывает числа полюсов от $2p=2$ до $2p=8$ и числа пазов 10 — 50. Предельное число пазов обусловлено допустимой у микродвигателей минимальной шириной зубца b_Z.

Как видно из таблицы, все значения τ_Z можно разбить на три группы:

1) τ_Z, кратное 3 (четное и нечетное);
2) τ_Z, не кратное 3, четное;
3) τ_Z, не кратное 3, нечетное.

В первой группе с нечетным τ_Z и третьей группе можно выполнить распределение проводников по пазам по прямоугольному, треугольному и трапецеидальному законам. В первой группе с четным τ_Z и третьей группе нельзя осуществить треугольное распределение по пазам.

Полюсное деление, кратное 3, при наиболее употребительных числах пазов на статоре ($Z_S = 18$, 24, 30) имеет место только у быстроходных машин (с $2p=2$ и 4). С увеличением числа полюсов уменьшается число возможных вариантов выполнения „синусных" обмоток.

При выборе распределения проводников по пазам в „синусных" обмотках идеальным условием было бы уничтожение всех высших гармоник в кривой н. с., но это практически неосуществимо. Поэтому приходится выбирать оптимальный вариант распределения, при котором третья гармоника, наиболее выраженная в однофазных машинах, исчезает полностью, а пятая и седьмая проявляются незначительно. Такому условию может удовлетворять только кривая распределения проводников $u_{пx} = \varphi(x)$ в виде криволинейной

Таблица 2-3

личных сочетаниях Z_S и $2p$

28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
14	**15**	16	17	**18**	19	20	**21**	22	23	**24**	25
7	—	8	—	**9**	—	10	—	11	—	**12**	
—	5	—	—	**6**	—	—	7	—	—	8	—
—	—	4	—	—	—	5	—	—	—	**6**	—

трапеции с верхним основанием, равным $^1/_3$ полюсного деления. Поэтому для осуществления оптимального варианта число пазов статора, приходящееся на одно полюсное деление, должно делиться на 3 без остатка, т. е. $\frac{\tau_Z}{3} = \frac{Z_S}{6p}$, и быть равным целому числу (четному или нечетному).

При этом $^1/_3$ пазов, составляющих полюсное деление, должна быть занята максимально возможным по заполнению паза числом проводников $u_{\text{п}xm}$.

В табл. 2-3 выделены жирным шрифтом значения τ_Z, позволяющие осуществить оптимальное распределение проводников.

Условие оптимальности аналитически можно выразить так:

$$k_{03} = 0; \; k_{05} \to 0; \; k_{07} \to 0,$$

т. е.

$$k_{03} = \frac{f(x_0) + \Sigma\Delta f(x_n) \cos 3x_n}{f_c(x)} = 0. \qquad (2\text{-}27)$$

Для того чтобы это равенство удовлетворялось, необходимо, чтобы сумма положительных членов в числителе была равна сумме отрицательных членов. Член $f(x_0)$ будет либо равным нулю, либо положительным.

За начало отсчета $x_0 = 0$ в ступенчатом графике н. с. следует принимать:

1) либо точку, соответствующую среднему из максимально заполненных пазов, если $\tau_Z = \frac{Z_S}{2p}$ — нечетное число $[f(x_0) > 0]$ (рис. 2-19);

2) либо точку, лежащую посредине между двумя максимально заполненными пазами, если $\tau_Z = \frac{Z_S}{2p}$ — четное число $[f(x_0) = 0]$ (этот случай рассмотрен в примере расчета в § 13-4).

$\cos 3x_n$ положителен, если $3x_n < \frac{\pi}{2}$, т. е. если $x_n < \frac{\pi}{6}$;

$\cos 3x_n$ отрицателен, если $3x_n > \frac{\pi}{2}$, т. е. если $x_n > \frac{\pi}{6}$.

Учитывая, что приращение ординаты н. с. $\Delta f(x_n)$ при переходе через паз равно полному току паза, т. е. пропорционально числу проводников паза $u_{пx}$, можно подобрать закон распределения проводников по пазам, оптимальный в отношении третьей гармоники, по формуле

$$\underbrace{f(x_0) + \Sigma\Delta f(x_n)\cos 3x_n}_{x_n < \frac{\pi}{6}} = -\underbrace{\Sigma\Delta f(x_n)\cos 3x_n}_{x_n > \frac{\pi}{6}}, \qquad (2\text{-}28)$$

где $0 < x_n < \frac{\pi}{2}$.

В табл. 2-4 приведены значения абсцисс x_n кривой н. с. $F = f(x_n)$ при четном и нечетном значениях $^1/_3$ полюсного деления, удовлетворяющих трапецеидальному закону распределения проводников по пазам.

Таблица 2-4

Значение абсцисс x_n

При $\frac{\tau_Z}{3}$ нечетном	При $\frac{\tau_Z}{3}$ четном
$x_0 = 0$	$x_0 = 0$
$x_1 = \frac{2p}{Z_S}\pi$	$x_1 = \frac{p}{Z_S}\pi$
$x_2 = \frac{4p}{Z_S}\pi$	$x_2 = \frac{3p}{Z_S}\pi$
$x_3 = \frac{6p}{Z_S}\pi$	$x_3 = \frac{5p}{Z_S}\pi$
$x_4 = \frac{8p}{Z_S}\pi$ и т. д.	$x_4 = \frac{7p}{Z_S}\pi$ и т. д.

Порядок расчета

„Синусная" обмотка рассчитывается следующим образом:

1. Выбирают число пазов статора в соответствии с табл. 2-3, позволяющее выполнить „синусную" обмотку при оптимальном распределении проводников по пазам по условию $\frac{Z_S}{2p}$ = целому числу, кратному 3.

2. Предварительно определяют распределение проводников главной и вспомогательной обмоток по пазам в относительных единицах с учетом того, что пазы $^1/_3$ полюсного деления должны иметь максимальное число проводников $u_{пxm}$ и что боковые стороны трапеции (см. рис. 2-19) — прямые линии.

3. Для принятого закона распределения строят ступенчатый график н. с. $f(x)$.

4. Проверяют обмоточные коэффициенты первой, третьей, пятой и седьмой гармоник для предварительно принятого распределения проводников (пп. 2 и 3), затем подбирается оптимальное распределение проводников по пазам для главной и вспомогательной обмоток из условий $k_{03}=0$; k_{05} и $k_{07} \to 0$ по (2-28); при этом используется табл. 2-4.

5. Рассчитывают предварительно число катушек и число витков в катушках главной и вспомогательной обмоток в соответствии с принятым законом распределения проводников по пазам (в относительных единицах). Число витков вспомогательной обмотки определяют по известному коэффициенту трансформации $w_B = kw_A$. Следует иметь в виду, что обмоточные коэффициенты для „синусной" обмотки в обеих фазах одинаковы: $k_{0A} = k_{0B}$.

6. Определяют размеры каждого паза, исходя из условий:

1) выбранных сечений провода при заданной плотности тока в номинальном режиме для главной обмотки и пусковом режиме для вспомогательной обмотки;

2) максимального коэффициента заполнения каждого паза $k_{зап} \leqslant 0{,}75$;

3) равномерного суммарного заполнения пазов проводниками обеих фаз.

7. Окончательно выбирают конфигурацию и размеры пазов статора и уточняют расчет обеих обмоток.

8. Определяют обмоточные коэффициенты для первой, пятой, седьмой и т. д. гармоник.

Рекомендуемый порядок расчета иллюстрируется примерами расчета «синусных» обмоток (см. § 13-4).

2-5. ПАЗЫ И ЯРМО СТАТОРА

Выбор формы паза

Для статоров машин малой мощности применяются пазы, изображенные на рис. 2-21: овальный, полуовальный и трапецеидальный, обеспечивающие одинаковую ширину зубца по всей его высоте. Овальный паз (рис. 2-21,*а*) имеет наиболее простой штамп; кроме того, магнитное сопротивление у основания его меньше, чем у оснований полуовального и трапецеидального пазов, что уменьшает необходимую н. с. зубцового слоя.

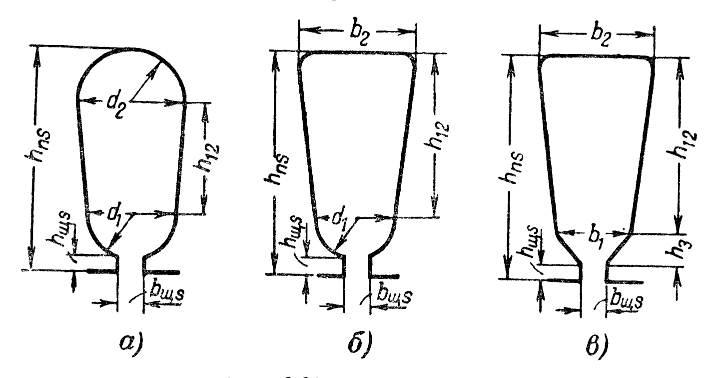


Рис. 2-21. Пазы статора.

а — овальный; *б* — полуовальный; *в* — трапецеидальный.

Паз полуовальный имеет бо́льшую площадь, чем овальный. Наибольшей площадью обладает трапецеидальный паз. Однако он является менее технологичным, чем полуовальный.

Если требование дешевизны штампа не является основным, то выбор оптимального варианта по площади паза и величине н. с. следует произвести после сравнительного расчета всех трех типов пазов.

Размеры паза и ярма статора

Ширина зубца статора b_{zS} выбирается из конструктивных соображений, а именно: прочности зубца, простоты и деше-

визны изготовления штампа, прочности штампа, а также с учетом допустимых индукций в зубце.

Высота спинки статора

$$h_{aS} \approx 0{,}2 b_{zS} \frac{Z_S}{p}. \qquad (2\text{-}29)$$

Она лимитируется допустимой индукцией в спинке.

Размеры прорези (щели) могут быть выбраны следующими: высота прорези $h_{щ} \geqslant 0{,}5$ *мм*; ширина прорези $b_{щ} = d_{из} + 1{,}1 \div 1{,}5$, где $d_{из}$ — диаметр изолированного проводника обмотки статора, *мм*.

Размеры пазов обычно рассчитываются в миллиметрах.

Размеры овального паза (рис. 2-21,*а*) рассчитываются по формулам:

$$d_1 = \frac{\pi (D + 2h_{щ}) - b_{zS} Z_S}{Z_S - \pi}, \qquad (2\text{-}30)$$

где D — внутренний диаметр статора;

$$d_2 = \frac{\pi (D_а - 2h_{aS}) - b_{zS} Z_S}{Z_S + \pi}, \qquad (2\text{-}31)$$

где $D_а$ — наружный диаметр статора.

Высота паза

$$h_{пS} = \frac{D_а - D - 2h_{aS}}{2}. \qquad (2\text{-}32)$$

Высота прямой части паза

$$h_{12} = h_{пS} - 0{,}5 (d_2 + d_1 + 2h_{щS}). \qquad (2\text{-}33)$$

Площадь паза

$$S_{пS} = \frac{\pi}{8} (d_1^2 + d_2^2) + 0{,}5 h_{12} (d_1 + d_2). \qquad (2\text{-}34)$$

Размеры полуовального паза (рис. 2-21,*б*) рассчитываются по формулам:

$$d_1 = \frac{\pi (D + 2h_{щS}) - b_{zS} Z_S}{Z_S - \pi}; \qquad (2\text{-}35)$$

$$b_2 = \frac{\pi (D_а - 2h_{aS})}{Z_S} - b_{zS}. \qquad (2\text{-}36)$$

Высота паза

$$h_{\text{п}S}=\frac{D_{\text{а}}-D-2h_{aS}}{2}. \qquad (2\text{-}37)$$

Высота прямой части паза

$$h_{12}=h_{\text{п}S}-0{,}5\,(d_1+2h_{\text{щ}S}). \qquad (2\text{-}38)$$

Площадь паза

$$S_{\text{и}S}=\frac{\pi d_1^2}{8}+\frac{1}{2}\,h_{12}\,(d_1+b_2). \qquad (2\text{-}39)$$

Размеры трапецеидального паза (см. рис. 2-21,*в*) рассчитываются по формулам:

$$b_1=\frac{\pi\,[D+2\,(h_3+h_{\text{щ}S})]}{Z_S}-b_{zS}. \qquad (2\text{-}40)$$

Обычно

$$h_3+h_{\text{щ}S}\approx\frac{1}{3}\,b_2;$$

$$b_2=\frac{\pi\,(D_{\text{а}}-2h_{\text{а}S})}{Z_S}-b_{zS}. \qquad (2\text{-}41)$$

Высота паза

$$h_{\text{п}S}=\frac{D_{\text{а}}-D-2h_{\text{а}S}}{2}. \qquad (2\text{-}42)$$

Высота прямой части паза

$$h_{12}=h_{\text{п}S}-(h_3+h_{\text{щ}S}). \qquad (2\text{-}43)$$

Площадь паза

$$S_{\text{п}S}=0{,}5\,[h_{12}\,(b_1+b_2)+h_3\,(b_1+b_{\text{щ}S})]. \qquad (2\text{-}44)$$

Изоляция паза

Структура изоляции паза показана на рис. 2-22.

В качестве пазовой изоляции применяется электрокартон толщиной 0,1; 0,15 и 0,2 *мм*, оклеенный триацетатной и ацетобутуратной пленкой толщиной 0,025—0,04 *мм* с обеих сторон.

Для пазового клина применяются твердое дерево или фибра. Высота клина — до 1,5—2 *мм*.

Часто в машинах мощностью в несколько десятков ватт и менее клин не ставят, а ограничиваются одной пазовой крышкой из электрокартона.

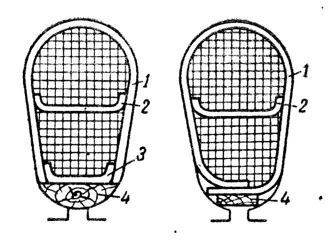


Рис. 2-22 Изоляция паза. 1 — коробка пазовая; 2 — прокладка (при однослойной обмотке отсутствует); 3 — крышка пазовая; 4 — клин.

Данные изоляции паза двигателей единой серии приведены в приложении 4.

Коэффициент заполнения паза рассчитывается по формуле[1]

$$k_{зап} = \frac{d_{из}^2 u_п}{S_{пS} - S_{из}} \leqslant 0{,}75, \qquad (2\text{-}45)$$

где $d_{из}$ — диаметр провода с изоляцией;

$u_п$ — число проводников в пазу;

$S_{пS}$ — площадь паза в штампе;

$S_{из}$ — площадь изоляции паза (включая клин).

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПАЗЫ, ЯРМО И БЕЛИЧЬЯ КЛЕТКА РОТОРА

3-1. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ РОТОРА

Число пазов на роторе выбирается в соответствии с рекомендуемым соотношением Z_S/Z_R (см. § 2-1).

Следует отметить, что небольшое число пазов ротора ($Z_R < Z_S$) благоприятно для заливки роторов под давлением, так как обеспечивает достаточную толщину стержней.

Размеры ротора (ярма, паза, стержня, короткозамыкающих колец) зависят, с одной стороны, от допустимых по условию малошумности значений индукций в зубце и ярме

---

[1] На заводах часто пользуются другим коэффициентом заполнения, рассчитанным по формуле

$$k'_{зап} = \frac{\pi d_{из}^2 u_п}{4 S_{пS}} \leqslant 0{,}45.$$

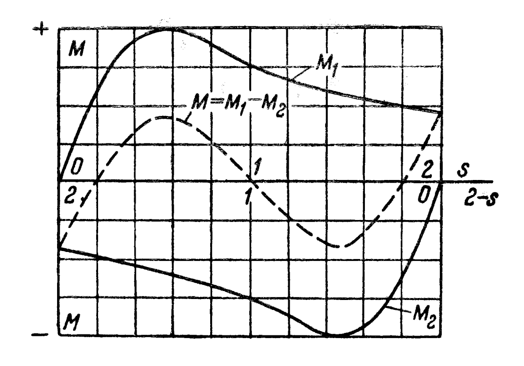


Рис. 3-1. Зависимость вращающего момента однофазного двигателя от скольжения при большом активном сопротивлении цепи ротора.

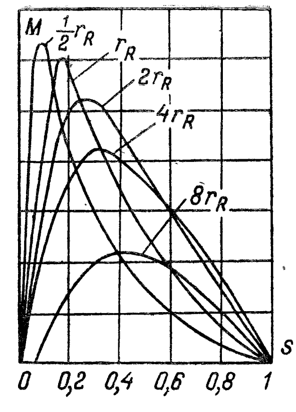


Рис. 3-2. Зависимость вращающего момента однофазного двигателя от скольжения при различных сопротивлениях цепи ротора.

ротора, с другой—от требуемой перегрузочной способности двигателя $m_m = \frac{M_m}{M_н}$.

В отличие от трехфазного двигателя максимальный момент вращения однофазного двигателя зависит от активного сопротивления ротора. Это получается потому, что при повышении сопротивления ротора возрастают тормозные моменты обратного поля, понижающие максимальное значение результирующего момента. На рис. 3-1 приведена зависимость вращающего момента от скольжения однофазного двигателя (пульсирующее поле) при весьма большом активном сопротивлении ротора.

Примерная зависимость результирующего момента вращения $M = M_1 + M_2$ на валу двигателя от скольжения при изменении активного сопротивления ротора r_R показана на рис. 3-2.

Как видно из рисунка, с увеличением сопротивления ротора перегрузочная способность двигателя уменьшается, а скольжение, соответствующее максималному моменту, увеличивается. В дальнейшем это скольжение будем условно называть «максимальным». Для конденсаторного двигателя (эллиптическое поле) зависимость момента от скольжения приведена на рис. 3-3. Из кривой видно, что влияние обратного поля на результирующий момент невелико, и максимальный момент мало зависит от активного сопротивления ротора.

У трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 10—600 *вт* кратность максимального момента m_m согласно ГОСТ 8212-56 колеблется в пределах 1,5—2,2 (меньшие величины соответствуют двигателям меньшей мощности).

У отечественных однофазных микродвигателей пределы m_m примерно те же, что и у трехфазных двигателей [Л. 29].

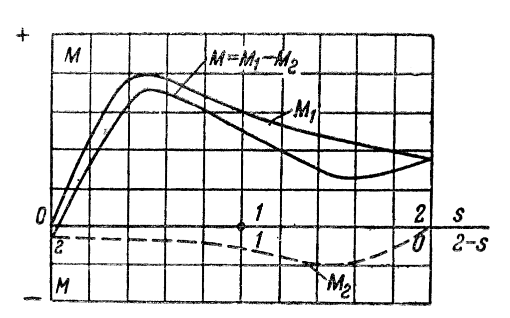


Рис. 3-3. Зависимость вращающего момента конденсаторного двигателя от скольжения при большом активном сопротивлении цепи ротора.

Кратность максимального момента при круговом поле у трехфазных двигателей связана с номинальным и „максимальным" скольжением ($s_н$ и s_m) следующей зависимостью:

$$m_m = \frac{\frac{s_н}{s_m} + \frac{s_m}{s_н} + \gamma s_m}{2 + \gamma s_m}, \qquad (3\text{-}1)$$

где $\gamma = \frac{2r_S}{r_R}$.

Формула (3-1) позволяет при заданных номинальном скольжении $s_н$ и перегрузочной способности m_m определить предварительно „максимальное" скольжение.

У микродвигателей величина γ лежит в пределах $1 \div 3$. Если пользоваться в уравнении (3-1) только значением $\gamma=2$, то ошибка будет небольшой.

Кривая рис. 3-4 дает зависимость $s_m = f(s_н)$ при $m_m = \text{const}$ и $\gamma = 2$.

Так как у однофазных двигателей с короткозамкнутым ротором $s_m = 0{,}2 \div 0{,}3$, то влиянием поля обратной после-

довательности на величину момента в диапазоне скольжений от $s_н$ до s_m в первом приближении можно пренебречь и пользоваться при расчете ротора формулой (3-1) или кривыми рис. 3-4, соответствующими наличию кругового поля в двигателе.

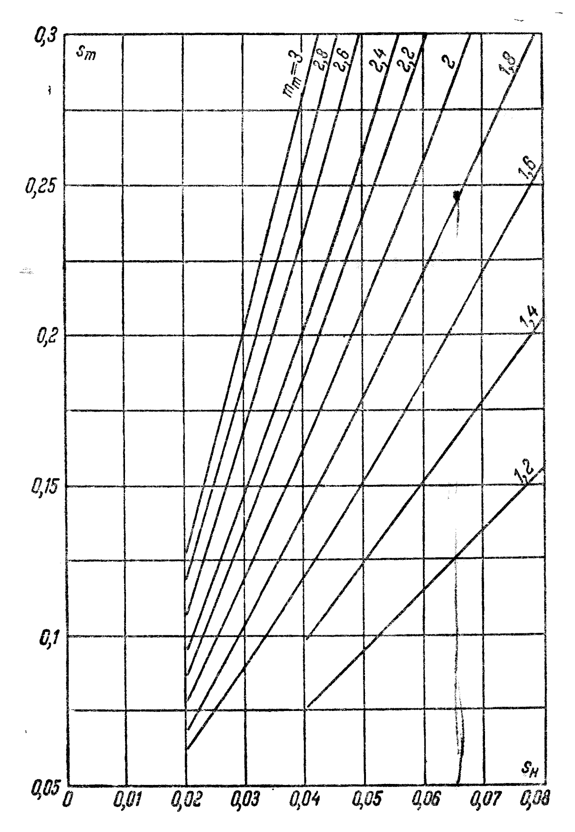


Рис. 3-4. Зависимость „максимального" скольжения s_m от номинального скольжения $s_н$ при различной кратности максимального момента m_m.

В дальнейшем при расчете рабочих характеристик однофазного двигателя величины m_m, s_m и $s_н$ могут быть уточнены с учетом поля обратной последовательности.

Следует иметь в виду, что в однофазных двигателях с отключаемой вспомогательной обмоткой перегрузочная

способность определяется по максимальному моменту для однофазного режима (при питании только главной обмотки).

При проектировании ротора наиболее важно выбрать параметры обмотки ротора, обеспечивающие необходимое „максимальное“ скольжение s_m. Для микродвигателей можно воспользоваться упрощенной формулой [Л. 9]

$$s_m = 1 - \sqrt{1 - 1{,}05 \frac{r_R}{x_к} \operatorname{tg} \alpha}, \tag{3-2}$$

где $\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{r_R}{x_к}$.

Зависимость $\frac{r_R}{x_к} = f(s_m)$ приведена на кривой рис. 3-5.

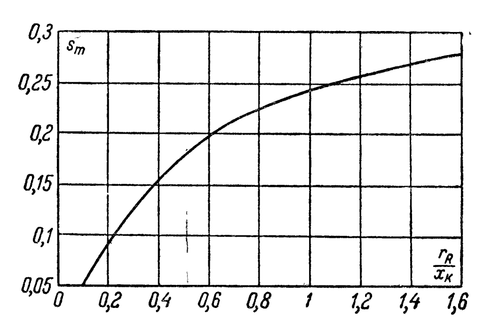


Рис. 3-5. Зависимость $\frac{r_R}{x_к} = f(s_m)$.

Рекомендуется следующий порядок расчета параметров обмотки ротора для получения заданной перегрузочной способности:

1. Выбирают номинальное скольжение микродвигателя, которое обычно лежит в пределах $s_н = 0{,}03 \div 0{,}07$.

В единой серии двигателей малой мощности номинальное скольжение у трехфазных двигателей равно $s_н = 0{,}067$, а у конденсаторных и однофазных с пусковой обмоткой $s_н = 0{,}033 \div 0{,}05$.

В соответствии с номинальным скольжением $s_н$ и заданной кратностью максимального момента m_m по кривой рис. 3-4 устанавливается необходимое скольжение s_m.

2. Принимая предварительно $x_к = 2x_S$, находят активное сопротивление обмотки ротора r_R по формуле (3-2) или кривой $\frac{r_R}{x_к} = f(s_m)$ рис. 3-5.

3. По сопротивлению r_R и выбранному числу пазов ротора определяют необходимое сопротивление одного элемента роторной клетки:

$$r_э = r_{ст} + \frac{r_{кл}}{2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_R}} = \frac{r_R Z_R k_{oR}^2}{4mw_S^2 k_{oS}^2}. \qquad (3\text{-}3)$$

У однофазных двигателей с пусковыми элементами в формуле (3-3) вместо 4 следует подставлять 8.

4. Стержни и кольца подбирают так, чтобы их активные сопротивления удовлетворяли значению $r_э$, а сечения соответствовали допустимой плотности тока.

При заливке алюминием допустимая плотность тока в стержнях ротора у трехфазных и конденсаторных двигателей $\Delta_{ст} = 3 \div 5$ *а/мм²*, а у однофазных с пусковыми элементами $\Delta_{ст} = 2 \div 3$ *а/мм²*; в медных стержнях допустимая плотность тока больше и составляет соответственно $\Delta_{ст} = 6 \div 8$ *а/мм²* и $\Delta_{ст} = 3{,}5 \div 5$ *а/мм²*.

В короткозамкнутом кольце плотность тока составляет $\Delta_{кл} = (0{,}6 \div 0{,}8)\,\Delta_{ст}$.

5. По найденным размерам ротора определяют приведенное индуктивное сопротивление ротора x_R (см. § 4-2) и проверяют значение индуктивного сопротивления короткого замыкания $x_к = x_S + x_R$. Если оно не совпадает по величине с принятым ранее $x_к = 2x_S$, то по нему снова устанавливают по кривым рис. 3-5 требуемое значение r_R.

Сечения роторных стержней и колец несколько изменяют до получения достаточного совпадения.

3-2. ВЫБОР ФОРМЫ И РАСЧЕТ ПАЗА РОТОРА

Пазы ротора выполняются как круглыми, так и овальными, обычно закрытыми, с целью обеспечения надежности штампа и простоты заливки алюминием (рис. 3-6).

Круглый паз наиболее прост с точки зрения изготовления штампа, однако сечение стержней при круглом пазе

может оказаться по расчету недостаточным и приходится переходить на овальный паз.

Овальный паз обеспечивает постоянство ширины зубца по высоте. Размер d_{2R} (рис. 3-6,*в* и *г*) берется не менее 2,5 *мм* по условиям наилучшего заполнения площади паза алюминием.

Для пазов с прорезью на практике осуществляют заливку паза с выступом (рис. 3-6,*г*), обеспечивающим последующее открытие паза путем механической обработки.

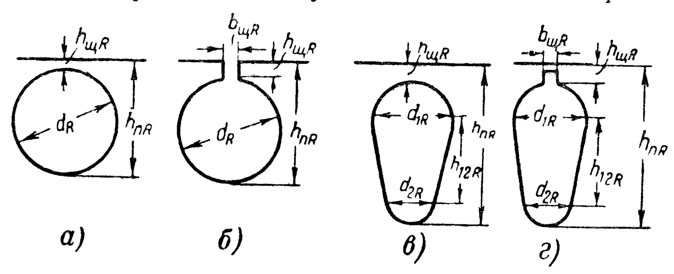


Рис. 3-6. Формы пазов ротора.
а и *б* — круглый паз; *в* и *г* — овальный паз.

У микродвигателей по условиям прочности штампа минимально возможная высота мостика $h_{щR} = 0,3 \div 0,4$ *мм*.

При насыщении этот мостик создает эффект открытия паза. Ширина прорези паза берется равной $b_{щR} = 1 - 1,5$ *мм*.

Размеры круглого паза (рис. 3-6,*а* и *б*):

Диаметр паза

$$d_R = \frac{[D - 2(\delta + h_{щR})]\,\pi - b_{zR} Z_R}{Z_R + \pi}, \qquad (3\text{-}4)$$

где D — внутренний диаметр статора;
Z_R — число пазов ротора;
b_{zR} — ширина зубца ротора;
$h_{пR} = d_R + h_{щR}$ — высота паза ротора.

Площадь паза

$$S_{пR} = \frac{\pi d_R^2}{4}.$$

Размеры овального паза (рис. 3-6, *в* и *г*):

$$d_{1R} = \frac{[D - 2(\delta + h_{щR})]\,\pi - b_{zR} Z_R}{Z_R + \pi}. \qquad (3\text{-}5)$$

Высота прямой части паза

$$h_{12R} = \frac{1}{2}\left[D - d_{1R} - 2h_{шR} - \frac{Z_R(b_{zR} + d_{2R})}{\pi}\right]. \qquad (3\text{-}6)$$

Высота паза

$$h_{пR} = \frac{1}{2}(d_{1R} + d_{2R}) + h_{12R} + h_{шR}. \qquad (3\text{-}7)$$

Площадь паза

$$S_{пR} = \frac{\pi}{8}(d_{1R}^2 + d_{2R}^2) + \frac{1}{2}h_{12R}(d_{1R} + d_{2R}). \qquad (3\text{-}8)$$

3-3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА СКОСА

Для уменьшения шума и паразитных моментов у нормальных двигателей с короткозамкнутым ротором применяется скос пазов на статоре или роторе. Скос пазов у микродвигателей чаще всего выполняется на роторе и выбирается равным примерно одному зубцовому делению статора. При выполнении скоса пазов на статоре он берется равным примерно одному зубцовому делению ротора.

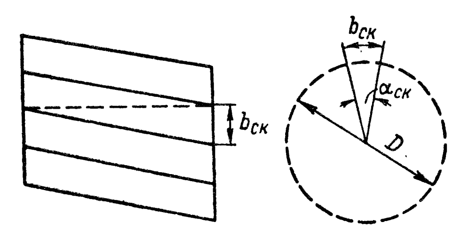


Рис. 3-7. К определению коэффициента скоса.

Коэффициент скоса паза учитывает уменьшение э. д. с., наведенной в одной из обмоток главным потоком другой обмотки, поэтому он определяется аналогично обмоточному коэффициенту распределения обмотки ротора:

$$k_{оR} = k_{ск}.$$

Коэффициент скоса пазов может быть рассчитан по формуле

$$k_{ск} = \frac{2\sin\frac{\alpha_{ск}}{2}}{\alpha_{ск}} = \frac{\sin\frac{b_{ск}\pi}{2\tau}}{\frac{b_{ск}\pi}{2\tau}} = \frac{\sin\frac{\pi p}{Z_R}}{\frac{\pi p}{Z_R}}, \qquad (3\text{-}9)$$

где $\alpha_{ск} = \frac{b_{ск}\pi}{\tau} = \frac{2pb_{ск}}{D}$ — центральный угол скоса пазов, *рад*;

$\alpha_{ск} = \frac{2\pi p}{Z_R}$ в электрических градусах в соответствии с рис. 3-7;

$b_{ск} = \beta_{ск} t_R$ — скос пазов, отсчитанный по дуге окружности ротора, *мм*;

$t_R = \frac{\pi D'}{Z_R}$ — зубцовое деление ротора, *мм*;

$D' = D - 2\delta$ — наружный диаметр ротора, *мм*;

$\beta_{ск}$ — скос пазов в долях зубцового деления.

Следует отметить, что при скошенных пазах несколько возрастает дифференциальное рассеяние, так как высшие гармоники поля в этом случае меньше заглушаются.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА

4-1. СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАТОРА

Определение активного и индуктивного сопротивлений обмоток статора и ротора является весьма важным элементом расчета машины, так как степень точности расчета характеристик зависит от точности расчета параметров.

Так же как и для нормальных асинхронных машин, в первом приближении можно считать, что сопротивления статора (r_S, x_S) и ротора (r_R, x_R) остаются постоянными при изменении режима работы от холостого хода до номинальной нагрузки.

При критическом скольжении s_m, соответствующем максимальному вращающему моменту, токи в обмотках статора I_S и ротора I_R превышают номинальные. При этом начинает сказываться насыщение зубцов от полей рассеяния и, следовательно, x_S и x_R уменьшаются.

При $s \geqslant s_m$ и, в частности, при $s = 1$ величина сопротивлений изменяется из-за вытеснения тока в стержнях роторной обмотки. Следует, однако, отметить, что при небольших размерах пазов микродвигателей вытеснение тока в стержнях ротора сказывается на параметрах ротора r_R и x_R значительно слабее, чем в нормальных машинах.

Обычно для машин малой мощности можно пользоваться одними и теми же параметрами для расчета рабочего и пускового режимов. Если потребуется учесть влияние насыщения и вытеснения тока в машине, то можно воспользоваться для этой цели методом завода «Электросила», хорошо известным в литературе [Л. 1].

Рис. 4-1. Элемент обмотки (половина секции).

Активное сопротивление обмотки статора

$$r_{St} = \rho \frac{L_S}{s_S a} \ [ом], \qquad (4\text{-}1)$$

где r_{St} — активное сопротивление обмотки статора при температуре нагрева $t°$;

L_S — общая длина проводников одной фазы обмотки статора (на одну параллельную ветвь):

$$L_S = 2l_{ср} w_S \cdot 10^{-2} \ [м]. \qquad (4\text{-}2)$$

Здесь w_S — число последовательных витков фазы;

$l_{ср} = l + l_л$ — средняя длина полувитка, *см* (рис. 4-1). Средняя длина лобовой части

$$l_л = k_1 \tau_у + 2B \ [см], \qquad (4\text{-}3)$$

где $\tau_у = t_{ср} y_{ср}$ [*см*];

$y_{ср}$ — средний шаг секции по пазам;

$t_{ср} = \frac{\pi D_{ср}}{Z_S}$ — зубцовое деление, отнесенное к среднему диаметру, *см*;

$D_{ср} = D + h_{пS}$ — средний диаметр, *см*;

D — внутренний диаметр статора, *см*;

$h_{пS}$ — высота паза статора, *см*.

Для равносекционных обмоток

$$\tau_у = \frac{\pi D_{ср}}{2p} \beta,$$

где β — шаг секции в долях полюсного деления;

k_1 и B — эмпирические коэффициенты из табл. 4-1;

s_S — площадь сечения проводника, *мм²*;

a — число параллельных ветвей;

ρ — удельное сопротивление материала обмотки, *ом·мм²/м*, по табл. 4-2.

Таблица 4-1

Коэффициенты k_1 и B для статорных обмоток

Число полюсов	Лобовые части секции не изолированы		Лобовые части секции изолированы лентой	
	k_1	B, *см*	k_1	B, *см*
2	1,2	1	1,45	1
4	1,3	1	1,55	1
6	1,4	1	1,75	1
8	1,5	1	1,9	1

Таблица 4-2

Удельное сопротивление для меди ρ, *ом·мм²/м*

Температура, °C	15	75	100	120	150
ρ	1/57	1/46	1/42,5	1/40	1/37

Индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора

Как известно из общей теории машин, индуктивное сопротивление рассеяния обмоток рассчитывается с помощью ряда эмпирических коэффициентов и формул. Можно рекомендовать формулы ВНИИ ЭМ [Л. 19 и 20].

Рассеяние разбивается условно на три вида:

1) пазовое;

2) обусловленное высшими гармониками (дифференциальное);

3) лобовое.

В соответствии с этим в расчетную формулу сопротивления x_S вводятся три коэффициента магнитной проводимости: $\lambda_п$ — пазового; $\lambda_д$ — дифференциального и $\lambda_л$ — лобового рассеяния.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора рассчитывается по формуле

$$x_S = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_S}{100}\right)^2 \frac{l}{pq} \Sigma\lambda_S, \qquad (4\text{-}4)$$

где $\Sigma\lambda_S = \lambda_п + \lambda_\delta + \lambda_л$ — суммарный коэффициент магнитной проводимости;

f — частота сети;

p — число пар полюсов;

w_S — число последовательно соединенных витков в фазе;

q — число пазов на полюс и фазу (для однофазных двигателей вместо q подставляется Q — число пазов каждой из обмоток на полюс);

l — расчетная длина статора.

Рассмотрим расчет коэффициентов магнитной проводимости для различных случаев.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния

Коэффициент $\lambda_п$ зависит от размеров и формы паза, а также от типа обмотки (однослойная или двухслойная). Он учитывает только рассеяние между стенками паза и усиками зубцов (рассеяние вне паза не учитывается).

У двухслойных обмоток с укорочением шага вследствие наличия в некоторых пазах катушек, принадлежащих разным фазам, общее потокосцепление уменьшается и, следовательно, уменьшается $\lambda_п$. Уменьшение магнитной проводимости $\lambda_п$ учитывается коэффициентами k_β и $k_{\beta 1}$, зависящими в свою очередь от укорочения.

На рис. 4-2 приведены формы пазов статора микродвигателей с учетом расположения меди.

Коэффициент магнитной проводимости для овального (рис. 4-2,*а*) и полуовального (рис. 4-2,*б*) пазов

$$\lambda_п = \left[\frac{h_1}{3d_1}k_\beta + \left(0{,}785 - \frac{b_{щ\,S}}{2d_1} + \frac{h_2}{d_1} + \frac{h_{щ\,S}}{b_{щ\,S}}\right)k_{\beta 1}\right]; \quad (4\text{-}5)$$

для трапецеидального паза (рис. 4-2,*в*)

$$\lambda_п = \left[\frac{h_1}{3b_1}k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_1} + \frac{3h_3}{b_1 + 2b_{щS}} + \frac{h_{щS}}{b_{щS}}\right)k_{\beta 1}\right]. \quad (4\text{-}6)$$

При расчете проводимостей размеры паза берут в штампе; размер h_1 определяется по меди с витковой изоляцией. Если нижняя кромка обмотки лежит ниже центра

верхней полуокружности, то величину h_2 следует считать отрицательной (рис. 4-2).

Коэффициенты k_β и $k_{\beta 1}$ определяются по табл. 4-3 в зависимости от коэффициента укорочения обмотки $\beta = \frac{y}{\tau}$ или отношения укорочения шага в зубцовых делениях S к числу секций на полюс Q. Если $1 < \beta \leq 2$, то вместо β для расчета

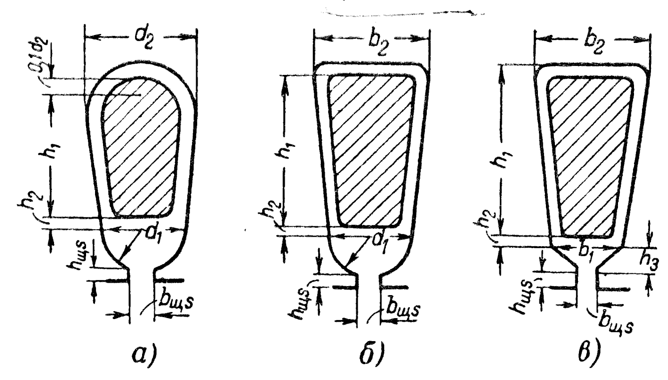


Рис. 4-2. Форма пазов статора и расположение меди в пазу.

а — овальный; *б* — полуовальный; *в* — трапецеидальный.

коэффициентов k_β и $k_{\beta 1}$ надо подставлять $2 - \beta$. Укорочение шага в зубцовых делениях рассчитывается как $S = \frac{Z_S}{2p} - y$, где y — шаг обмотки по пазам.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния учитывает потокосцепление рассеяния обмотки статора, обусловленное высшими гармониками поля (зубцовыми и обмоточными). Как известно, высшие гармоники поля статора наводят в его обмотке э. д. с. основной частоты, тогда как в обмотке ротора при его вращении они наводят э. д. с. высоких частот и поэтому практически не участвуют в передаче энергии от статора к ротору. Следовательно, потокосцепление высших гармоник можно рассматривать как потокосцепление рассеяния этой обмотки.

Часто вместо дифференциального рассеяния определяют рассеяние между коронками зубцов. Этот вид рассея-

Таблица 4-3

Коэффициенты k_β и $k_{\beta 1}$

Тип обмотки	β	k_β	$k_{\beta 1}$
Трехфазная двухслойная (60°-ная зона)	$\frac{2}{3} \leqslant \beta \leqslant 1$ $\frac{1}{3} \leqslant \beta \leqslant \frac{2}{3}$	$\frac{7+9\beta}{16}$ $\frac{1+18\beta}{16}$	$\frac{1+3\beta}{4}$ $\frac{6\beta-1}{4}$
Двухфазная двухслойная (90°-ная зона)	$\beta \leqslant 1$	$\frac{1+3\beta}{4}$	β
Однофазная двухслойная при $\frac{Z_S}{2p} \geqslant Q+S$ и $Q \geqslant S$	—	$1-\frac{3}{8}\frac{S}{Q}$	$1-\frac{S}{2Q}$
Однослойная диаметральная обмотка для любого числа фаз	$\beta = 1$	1	1

ния называют иногда «рассеянием в воздушном зазоре», имея в виду, что соответствующее ему поле определяется в основном проводимостью индукционных трубок в воздушном зазоре.

Точный учет полей дифференциального рассеяния составляет наиболее трудную задачу в области расчета параметров машин переменного тока [Л. 1 и 6]. Для микродвигателей этот вопрос усложняется наличием однофазных распределенных обмоток с катушками различных форм и размеров, а также малым числом пазов на полюс и фазу q или Q.

Коэффициент λ_δ зависит от размеров (зубцового деления, воздушного зазора) и обмоточных данных машины. Определенное влияние на дифференциальное рассеяние оказывает

также ширина прорези пазов статора и ротора, от которой зависит коэффициент воздушного зазора k_δ.

При малом числе пазов на полюс и фазу q, Q, которое имеет место в микродвигателях, дифференцильное рассеяние составляет существенную часть общего рассеяния.

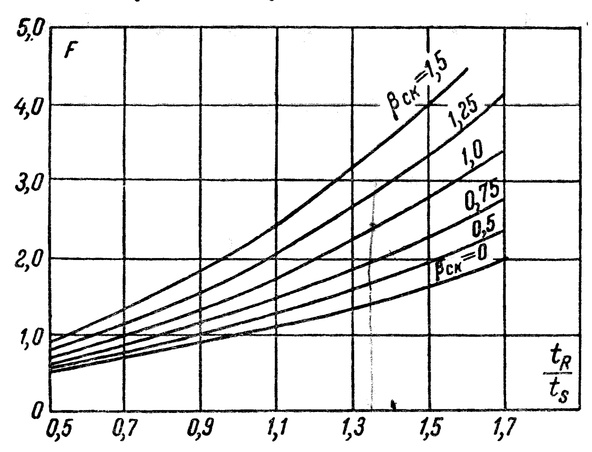


Рис. 4-3. $F = f\left(\frac{t_R}{t_S}\right)$ для различных коэффициентов скоса $\beta_{ск}$.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_\delta = \frac{t_S}{11{,}9\delta k_\delta} \xi_S, \qquad (4\text{-}7)$$

где t_S — зубцовое деление статора;

δ — воздушный зазор.

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = k_{\delta S} k_{\delta R},$$

где $k_{\delta S}$ — коэффициент воздушного зазора для статора;

$k_{\delta R}$ — коэффициент воздушного зазора для ротора;

$$k_{\delta S} = \frac{5 + \frac{b_{щS}}{\delta}}{5 + \frac{b_{щS}}{\delta} \cdot \frac{(t_S - b_{щS})}{t_S}}; \qquad (4\text{-}8)$$

$$k_{\delta R} = \frac{5 + \frac{b_{щR}}{\delta}}{5 + \frac{b_{щR}}{\delta} \frac{(t_R - b_{щR})}{t_R}}; \qquad (4\text{-}9)$$

t_R, $b_{щR}$ — зубцовое деление, ширина прорези паза ротора;

ξ_S — коэффициент, зависящий от q; β; $\frac{t_R}{t_S}$; $\beta_{ск}$;

$\beta_{ск} = \frac{b_{ск}}{t_R}$ — скос пазов в долях зубцового деления ротора;

$b_{ск}$ — скос пазов, отсчитанный по дуге окружности ротора.

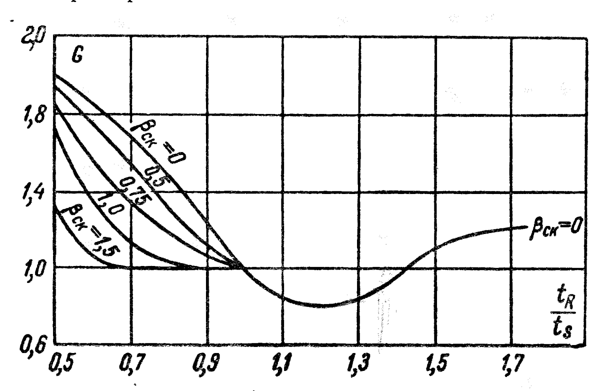


Рис. 4-4. $G = f\left(\frac{t_R}{t_S}\right)$ для различных коэффициентов скоса при $\beta_{ск} \geqslant 0{,}5$ и $\frac{t_R}{t_S} > 1$; $G = 1$.

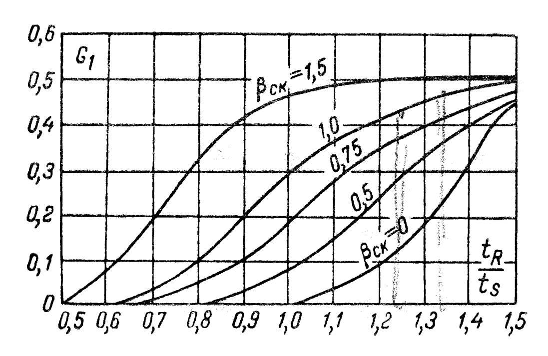


Рис. 4-5. $G_1 = f\left(\frac{t_R}{t_S}\right)$ для различных коэффициентов скоса $\beta_{ск}$ при $\frac{t_R}{t_S} > 1{,}5$; $G_1 = 0{,}5$.

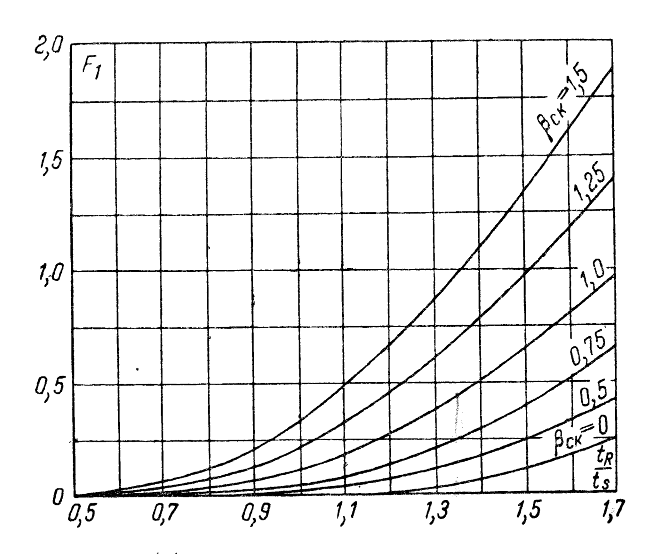


Рис. 4-6. $F_1 = f\left(\frac{t_R}{t_S}\right)$ для различных коэффициентов скоса $\beta_{ск}$.

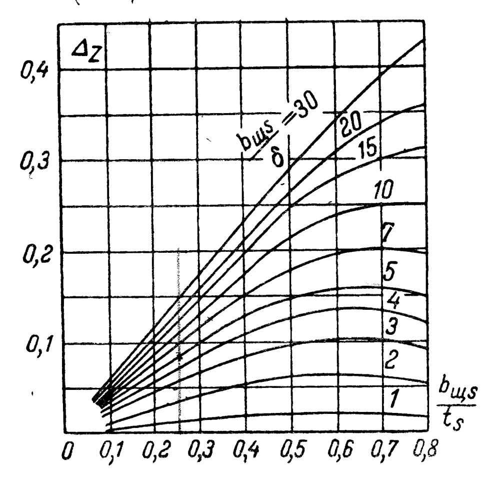


Рис. 4-7. $\Delta_z = f\left(\frac{b_{щ\,S}}{t_S}\right)$ для различных отношений прорези паза статора к воздушному зазору $\frac{b_{щ\,S}}{\delta}$ (для ротора берут $\frac{b_{щ\,R}}{t_R}$ и $\frac{b_{щ\,R}}{\delta}$ и находят Δ_z по той же кривой).

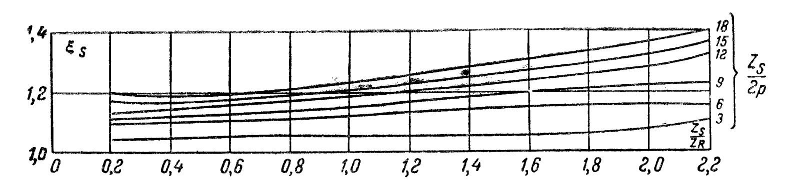


Рис. 4-8. К расчету дифференциального рассеяния однофазных двигателей с числом пазов на фазу: $^2/_3\ Z_S$ и $^1/_3\ Z_S$.

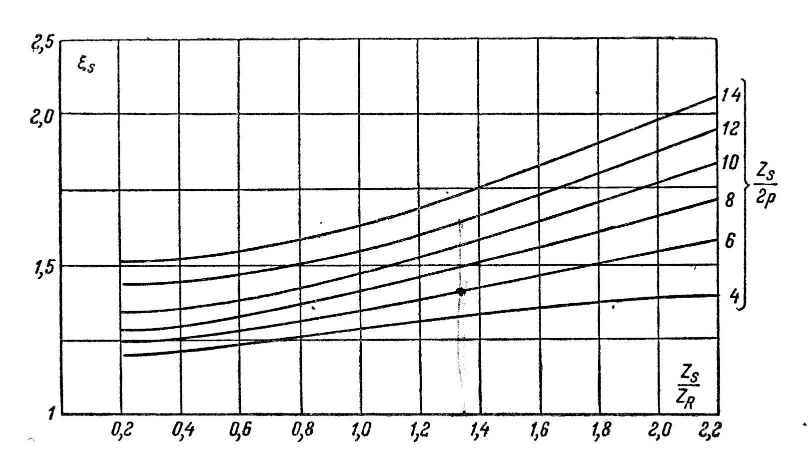


Рис. 4-9. К расчету дифференциального рассеяния однофазных двигателей с одинаковым числом пазов на обе фазы.

Коэффициент ξ_S может быть определен по формуле табл. 4-4 и кривым на рис. 4-3—4-7.

Для однофазных двигателей этот коэффициент может быть также найден по кривым Л. Грушковича (рис. 4-8) для случая, когда фаза занимает $^2/_3$ пазов статора, и по кривым на рис. 4-9 для случая, когда фаза занимает $^1/_2$ пазов статора [Л. 23].

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

Картина поля рассеяния лобовых частей также отличается большой сложностью. Она существенно зависит от типа обмотки [двухслойная равносекционная или корзиночная, катушечная с разделенными и неразделенными

Таблица 4-4

Коэффициент ξ_S

Трехфазная обмотка при наличии скоса пазов (60°-ная зона)	$\xi_S = 2\left(Fk_{\beta 1} - \frac{F_1 N}{4q}\right) - \Delta_z\left(Gk_{\beta 1} - \frac{G_1 N}{4q}\right) - k_{0S}^2 \times \left(\frac{t_R}{t_S}\right)^2 (1 + \beta_{ск}^2).$ $k_{\beta 1}$ — по табл. 4-3 для трехфазной обмотки	Коэффициенты F, G, F_1, $G_1 = f\left(\frac{t_R}{t_S}\right)$ по кривым на рис. 4-3—4-6. $\Delta_Z = f\left(\frac{b_{щS}}{t_S}, \frac{b_{щS}}{\delta}\right)$ по кривой на рис. 4-7.	$N = 1 - \frac{1}{2}\{1 - \lvert y - q\rvert\} + \frac{1}{2}\{1 - \lvert y - 2q\rvert\} + \{1 - \lvert y - 3q\rvert\}$
Двухфазная обмотка (90°-ная зона)	$\xi_S = 2\left(Fk_{\beta 1} - \frac{F_1 N}{2q}\right) - \Delta_z\left(Gk_{\beta 1} - \frac{G_1 N}{2q}\right) - k_{0S}^2\left(\frac{t_R}{t_S}\right)^2 (1 + \beta_{ск}^2).$ Для $\beta \leqslant 1$ $k_{\beta 1} = \beta$		$N = 1 + \{1 - \lvert y - 2q\rvert\}$ для диаметрального шага $N = 1$

Однофазная обмотка при условии $\frac{Z_S}{2p} \geqslant 2$	$\xi_S = 2\left(Fk_{\beta 1} - \frac{F_1 N}{2Q}\right) - \Delta_Z \left(Gk_{\beta 1} - \frac{G_1 N}{2Q}\right) - 4\frac{Qp}{Z_S} k_{0S}^2 \left(\frac{t_R}{t_S}\right)^2 [1 + \beta_{ск}^2 k_{ск}^2]$; $k_{ск} = \frac{\sin\frac{\pi p}{Z_R}}{\frac{\pi p}{Z_R}}$; $k_{\beta 1} = 1 - \frac{\frac{Z_S}{2p} - y}{2Q}$	Коэффициенты F, G, F_1, $G_1 = f\left(\frac{t_R}{t_S}\right)$ по кривым на рис. 4-3 — 4-6. $\Delta_Z = f\left(\frac{b_{щS}}{t_S}, \frac{b_{щS}}{\delta}\right)$ по кривой на рис. 4-7.	а) $Q < \frac{Z_S}{2p}$; диаметральный шаг $N = 1$; укороченный шаг: $Q \neq y$; $Q + y \neq \frac{Z_S}{2p}$; $N = 1$; $Q \neq y$; $Q + y = \frac{Z_S}{2p}$; $N = \frac{1}{2}$; $Q = y$; $Q + y \neq \frac{Z_S}{2p}$; $N = 1\frac{1}{2}$; $Q = y = \frac{Z_S}{4p}$; $N = 1$; б) $Q = \frac{Z_S}{2p}$; диаметральный шаг $N = 3$; укороченный шаг $N = 2$

Примечание. Прямые скобки в выражениях для N обозначают, что в расчете берется абсолютное значение, без учета знака.

Если выражение в фигурных скобках отрицательно, оно берется равным нулю.

группами катушек (рис. 4-10) и др.] и угла наклона лобовой части (трехплоскостная, двухплоскостная) (рис. 4-11).

Потокосцепление лобовой части пропорционально длине лобовой части $l_л$ и квадрату числа пазов на полюс и фазу q^2 или Q^2. Поток рассеяния в лобовых частях охватывает все q пазов при неразделенных обмотках и $^1/_2\ q$ пазов при разделенных обмотках в отличие от пазового рассеяния, которое не зависит от рядом лежащих $q-1$ пазов той же фазы.

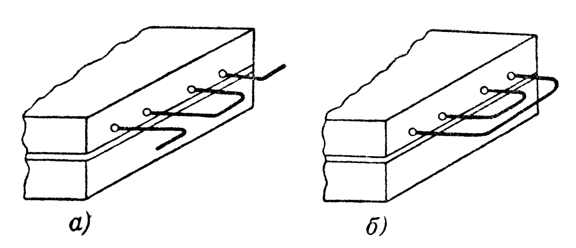


Рис. 4-10. Лобовые части катушечной обмотки.
а — разделенные; *б* — неразделенные.

Формула для индуктивного сопротивления лобового рассеяния может быть записана в следующем виде:

$$x_л = 4\pi f \mu_0 \frac{w_S^2}{pq} l_л q c_л = 4\pi f \mu_0 \frac{w_S^2}{pq} l\lambda_л, \qquad (4\text{-}10)$$

где $l_л$ — длина лобовой части обмотки;

$c_л$ — эмпирический коэффициент, зависящий от типа обмотки;

$\lambda_л = \frac{l_л}{l} q c_л$ — коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния.

Для катушечной подразделенной обмотки коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния $\lambda_л$ уменьшается. Укорочение шага обмотки также приводит к уменьшению $\lambda_л$.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитывается по следующим формулам.

Трехфазная двухслойная и однослойная цепная обмотки:

$$\lambda_л = 0{,}39 \frac{q}{l} (l_л - 0{,}64\beta\tau), \qquad (4\text{-}11)$$

где

$$\beta = \frac{y}{3q}.$$

Трехфазная однослойная катушечная обмотка:

а) трехплоскостная:

$$\lambda_л = 0{,}47 \frac{q}{l} (l_л - 0{,}64\tau); \qquad (4\text{-}12)$$

б) двухплоскостная:

$$\lambda_л = 0{,}67 \frac{q}{l} (l_л - 0{,}64\tau). \qquad (4\text{-}13)$$

Двухфазная двухслойная обмотка:

$$\lambda_л = 0{,}19 \frac{q}{l} (l_л - 0{,}64\beta\tau). \qquad (4\text{-}14)$$

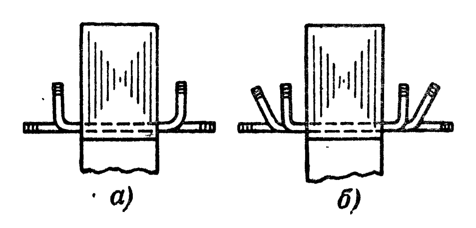


Рис. 4-11. Наклон лобовых частей обмоток.
а — двухплоскостной; *б* — трехплоскостной.

Двухфазная катушечная обмотка:

а) число катушечных групп на фазу $2p$ (подразделенная обмотка):

$$\lambda_л = 0{,}27 \frac{q}{l} (l_л - 0{,}64\tau); \qquad (4\text{-}15)$$

б) число катушечных групп на фазу p:

$$\lambda_л = 0{,}47 \frac{q}{l} (l_л - 0{,}64\tau). \qquad (4\text{-}16)$$

Однофазная двухслойная обмотка:

$$\lambda_л = 0{,}28 \left(1 - 0{,}6 \frac{2pQ}{Z_S}\right) \frac{Q}{l} (l_л - 0{,}64\beta\tau), \qquad (4\text{-}17)$$

где $\beta = \frac{y}{Z_S} 2p.$

Однофазная катушечная обмотка:

а) число катушечных групп $2p$ (подразделенная обмотка):

$$\lambda_{л} = 0{,}39\left(1 - 0{,}6\frac{2pQ}{Z_S}\right)\frac{Q}{l}(l_{л} - 0{,}64\tau); \qquad (4\text{-}18)$$

б) число катушечных групп p:

$$\lambda_{л} = 0{,}67\left(1 - 0{,}6\frac{2pQ}{Z_S}\right)\frac{Q}{l}(l_{л} - 0{,}64\tau). \qquad (4\text{-}19)$$

Формулы (4-17) — (4-19) применимы при $Q \geqslant 2$ и $\frac{2pQ}{Z_S} \geqslant \frac{1}{3}$; при $Q = 1$, а также при $\frac{2pQ}{Z_S} \leqslant \frac{1}{3}$ множитель $\left(1 - 0{,}6 \times \frac{2pQ}{Z_S}\right)$ следует заменить коэффициентом 0,8.

4-2. СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА

Активное сопротивление ротора

Активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора рассчитывается по формуле

$$r_R = \frac{4mw_S^2 k_{oS}^2}{Z_R k_{oR}^2}\left(r_{ст} + \frac{r_{кл}}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_R}}\right) = k_{12} r_{э}. \qquad (4\text{-}20)$$

В этой формуле сопротивление элемента роторной клетки

$$r_{э} = r_{ст} + \frac{r_{кл}}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_R}}, \qquad (4\text{-}21)$$

где $r_{ст}$ — сопротивление стержня ротора;

$r_{кл}$ — сопротивление части короткозамыкающего кольца;

Z_R — число пазов ротора.

В формуле (4-20) выражение

$$k_{12} = \frac{4mw_S^2 k_{oS}^2}{Z_R k_{oR}^2}$$

есть коэффициент приведения сопротивления ротора к обмотке статора.

Здесь k_{oS} — обмоточный коэффициент статорной обмотки;

$k_{oR} = k_{ск}$ — обмоточный коэффициент беличьей клетки ротора, если скос пазов производится на роторе.

Для однофазных двигателей с пусковыми элементами в выражение для коэффициента приведения вместо 4 следует подставлять 8.

В формуле (4-20) при условии $\frac{Z_R}{2p} \geqslant 6$ можно заменить $\sin \frac{\pi p}{Z_R}$ аргументом $\frac{\pi p}{Z_R}$.

Активное сопротивление стержня ротора

$$r_{\text{ст}} = \rho \frac{l_R}{s_{\text{ст}}} \; [\textit{ом}], \tag{4-22}$$

где $s_{\text{ст}}$ — площадь сечения стержня, *мм*²;

l_R — длина стержня, *м*.

При заливке алюминием сечение стержня равно сечению паза.

Активное сопротивление части короткозамкнутого кольца между стержнями

$$r_{\text{кл}} = \rho \frac{\pi D_{\text{кл}}}{Z_R \, ab} \; [\textit{ом}], \tag{4-23}$$

где $D_{\text{кл}}$ — средний диаметр кольца, *м*;

a и b — размеры сечения кольца, *мм*;

ρ — удельное сопротивление материала по табл. 4-5.

Выбор сечений стержня и короткозамкнутого кольца определяется допустимой плотностью тока (см. § 3-1).

Таблица 4-5

Удельное сопротивление материала, *ом · мм²/м*

Материал	Температура, °C				
	15	75	100	120	150
Медь	1/57	1/46	1/42,5	1/40	1/37
Алюминий	1/28	1/22,5	1/21,5	1/19,7	1/18,2
Латунь	1/15,5	1/12,5	1/11,5	1/11	1/10

Индуктивное сопротивление ротора

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, рассчитывается по формуле

$$x_R = x_S \frac{\Sigma \lambda'_R}{\Sigma \lambda_S}, \tag{4-24}$$

где

$$\Sigma\lambda'_R = \lambda_R \frac{l_R Z_S}{l Z_R}\left(\frac{k_{oS}}{k_{oR}}\right)^2. \qquad (4\text{-}25)$$

Суммарная проводимость рассеяния ротора равна:

а) для многофазных двигателей

$$\lambda_R = \lambda_{\text{п}\,R} + \lambda_{\delta\,R}\left(1 + \frac{\beta_{\text{ск}}^2}{k_\mu}\right) + \lambda_{\text{л}\,R}\frac{l_S}{l_R}; \qquad (4\text{-}26)$$

б) для однофазных двигателей

$$\lambda_R = \lambda_{\text{п}R} + \lambda_{\delta\,R} + \lambda_{\text{л}R}, \qquad (4\text{-}27)$$

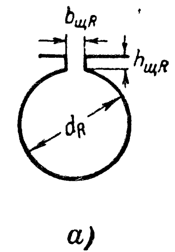
где $\lambda_{\text{п}R}$ — коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния;

$\lambda_{\delta\,R}$ — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния;

$\beta_{\text{ск}}$ — скос пазов в долях зубцового деления;

k_μ — коэффициент демпфирования (для микродвигателей можно принять $k_\mu = 1$);

$\lambda_{\text{л}R}$ — коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния.



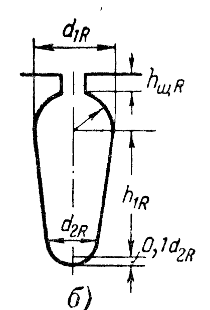


Рис. 4-12. К расчету магнитной проводимости рассеяния паза ротора.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния для круглого паза (рис. 4-12,*а*)

$$\lambda_{\text{п}R} = \left[\left(0{,}785 - \frac{b_{\text{щ}R}}{2d_R}\right)k_\mu + \frac{h_{\text{щ}R}}{b_{\text{щ}R}}\right]; \qquad (4\text{-}28)$$

для овального паза (рис. 4-12,*б*)

$$\lambda_{\text{п}R} = \left\{\left[\frac{h_{1R}}{3d_{1R}}\left(1 - \frac{\pi d_{1R}^2}{8s_{\text{ст}}}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_{\text{щ}R}}{2d_{1R}}\right]k_\mu + \frac{h_{\text{щ}R}}{b_{\text{щ}R}}\right\}, \qquad (4\text{-}29)$$

где $s_{\text{ст}}$ — сечение стержня;

для закрытого паза ($b_{щR}=0$) вместо $\frac{h_{щR}}{b_{щR}}$ нужно подставить

$$0{,}3+1{,}12\frac{h_{щR}\cdot 10^3}{I''_R},$$

где I''_R — действительный ток стержня, а $h_{щR}$ — высота мостика.

Формула (4-29) применима, если $I''_R \geqslant 5d_{1R}$.

В формулах (4-28) и (4-29) размеры паза в штампе даны в миллиметрах.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\delta R}=\frac{t_R}{11{,}9\delta k_\delta}\cdot\xi_R, \tag{4-30}$$

где

$$\xi_R=f\left(Z_R;\ \frac{b_{щR}}{t_R};\ \frac{b_{щR}}{\delta}\right).$$

При $\frac{Z_R}{2p}<5$

$$\xi_R=1+\frac{1}{5}\left(\frac{\pi p}{Z_R}\right)-\frac{\Delta_z}{1-\left(\frac{p}{Z_R}\right)^2};$$

при $\frac{Z_R}{2p}\geqslant 5$

$$\xi_R=1-\Delta_z;$$

$$\Delta_z=f\left(\frac{b_{щR}}{t_R};\ \frac{b_{щR}}{\delta}\right) \text{ по рис. 4-9.}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобовых частей

$$\lambda_{лR}=\frac{2{,}9D_{кл}}{Z_R\, l\left(2\sin\frac{\pi p}{Z_R}\right)^2}\lg\frac{4{,}7D_{кл}}{2(a+b)}, \tag{4-31}$$

где a — толщина кольца (в осевом направлении);
b — ширина кольца (в радиальном направлении).

Если короткозамкнутое кольцо примыкает к пакету ротора, то вместо a следует подставлять $\frac{a}{2}$.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

В расчет магнитной цепи входит определение намагничивающего тока I_μ, реактивной составляющей тока холостого хода I_{0r} и индуктивного сопротивления x_m, соответствующего потоку в воздушном зазоре.

Намагничивающий ток асинхронного двигателя может быть найден для многофазных машин из формулы

$$F = \frac{m}{2} \frac{0{,}9 I_{\mu m} w_S k_{oS}}{p}, \qquad (5\text{-}1)$$

где F — н. с. машины, приходящаяся на один полюс;

$I_{\mu m}$ — намагничивающий ток машины.

Обозначив н. с. машины на пару полюсов $F_{цепи} = 2F$, получим выражение для намагничивающего тока в следующем виде:

$$I_{\mu m} = \frac{F_{цепи} p}{0{,}9 m w_S k_{oS}}. \qquad (5\text{-}2)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода равна намагничивающему току:

$$I_{0r} = I_{\mu m}.$$

Для однофазных машин с пусковыми элементами ($m=1$) намагничивающий ток определяется по н. с. одной фазы (главной), рассчитанной по формуле

$$F = \frac{0{,}9 I_{\mu I} w_S k_{oS}}{p}.$$

В этой формуле величина F представляет собой н. с. одной катушки (или катушечной группы):

$$F = \frac{F_{цепи}}{2}.$$

Намагничивающий ток однофазного двигателя с пусковым элементом равен:

$$I_{\mu I} = \frac{Fp}{0{,}9 w_S k_{oS}} = \frac{F_{цепи} p}{1{,}8 w_S k_{oS}}. \qquad (5\text{-}3)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода у однофазных двигателей значительно больше намагничивающего

тока из-за наличия тока обратной последовательности и составляет:

$$I_{0r} \approx 1{,}95 I_{\mu}. \qquad (5\text{-}4)$$

Намагничивающая сила магнитной цепи асинхронной машины на пару полюсов равна:

$$F_{\text{цепи}} = F_{\delta} + F_{ZS} + F_{ZR} + F_{aS} + F_{aR}. \qquad (5\text{-}5)$$

Магнитное напряжение воздушного зазора F_{δ} определяется по формуле

$$F_{\delta} = 1{,}6 k_{\delta} B_{\delta} \delta, \qquad (5\text{-}6)$$

где B_{δ} — индукция в воздушном зазоре;
k_{δ} — коэффициент воздушного зазора;
δ — ширина воздушного зазора.

Магнитное напряжение зубцов статора

$$F_{ZS} = H_{ZS} 2 h_{ZS}. \qquad (5\text{-}7)$$

Напряженность магнитного поля H_{ZS} находится по индукции B_{ZS} для заданной марки стали (см. приложение 1). В современных машинах малой мощности $B_{ZS} \leqslant 20\,000$ *гс*.

Для случая, когда $B_{ZS} < 18\,000$ *гс*, индукция в зубце определяется по формуле

$$B_{ZS} = B_{\delta} \frac{t_S}{b_{ZS} \, k_{\text{с}}}, \qquad (5\text{-}8)$$

где $t_S = \frac{\pi D}{Z_S}$ — зубцовое деление статора;
b_{ZS} — ширина зубца;
$k_{\text{с}}$ — коэффициент заполнения пакета сталью; определяется по табл. 5-1.

Таблица 5-1

Коэффициент заполнения пакета сталью $k_{\text{с}}$

Толщина листа	Окалина—оксидировка	Лакировка
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,25	0,91	0,88

В микродвигателях изоляцией листов часто служит окалина или они покрываются тонким слоем изоляционного лака.

Для индукции в зубце статора $B_{ZS} > 18\,000$ *гс* напряженность поля и действительная индукция $B_{ZSд}$ находятся по данным кривой намагничивания (см. приложение 1) подбором или построением из равенства

$$B_{ZS} = B_{ZSд} + 1{,}256 H_{ZS} k_п, \qquad (5\text{-}9)$$

где B_{ZS} — теоретическая (кажущаяся) индукция в зубце;

$$k_п = \frac{b_{1/3}}{k_с b_Z}; \qquad (5\text{-}10)$$

$b_{1/3}$ — расчетная ширина паза.

Для круглого паза

$$b_{1/3} = 0{,}94 d_R. \qquad (5\text{-}11)$$

Для овального паза

$$b_{1/3} = \frac{b_{макс} + 2b_{мин}}{3}, \qquad (5\text{-}12)$$

где $b_{макс}$ — максимальная ширина трапецеидального участка паза;

$b_{мин}$ — минимальная ширина трапецеидального участка паза.

Расчетная высота зубца для паза с прямым дном $h_{ZS} = h_{пS}$ (см. рис. 2-21,*б* и *в*); для паза с полукруглым дном (рис. 2-21,*а*)

$$h_{ZS} = h_{пS} - 0{,}1 d_1.$$

Магнитное напряжение зубцов ротора

$$F_{ZR} = H_{ZR} 2 h_{ZR}.$$

Напряженность магнитного поля H_{ZR} находится по индукции для заданной марки стали (см. приложение 1), определяемой по формуле

$$B_{ZR} = \frac{B_\delta t_R}{b_{ZR} k_с}. \qquad (5\text{-}13)$$

Расчетная ширина зубца для круглого паза (см. рис. 3-6, *а* и *б*)

$$b_{ZR} = t_{1/3} - 0{,}94 d_R, \qquad (5\text{-}14)$$

где $t_{1/3} = \frac{\pi}{Z_R}\left(D_{ср} + \frac{d_R}{3}\right)$ — расчетное зубцовое деление;

$D_{ср}$ — диаметр окружности центров пазов.

Для трапецеидального зубца (овальный паз) (см. рис. 3-6, *в* и *г*)

$$b_{ZR} = \frac{b_{Z\,макс} + 2b_{Z\,мин}}{3}. \tag{5-15}$$

Расчетная высота зубца h_{ZR} для круглого паза (см. рис. 3-6, *а* и *б*)

$$h_{ZR} = h_{пR} - 0{,}1d_R; \tag{5-16}$$

для паза с полукруглым дном (см. рис. 3-6, *в* и *г*)

$$h_{ZR} = h_{пR} - 0{,}1d_{2R}. \tag{5-17}$$

Для индукции в зубце ротора $B_{ZR} > 18\,000$ *гс* применяется тот же метод расчета, что и для зубцов статора [см. формулы (5-9) — (5-12)].

Индукция в зубце ротора B_{ZR} не должна превышать 20 000 *гс* (например, в единой серии двигателей малой мощности она лежит в пределах $B_{ZR} = 13\,000 - 17\,300$ *гс*).

Магнитное напряжение ярма статора

$$F_{aS} = \xi H_{aS} \frac{\pi(D_a - h_{aS})}{2p}, \tag{5-18}$$

где D_a — наружный диаметр статора;

h_{aS} — высота ярма статора.

Напряженность магнитного поля H_{aS} находится по индукции B_{aS}:

$$B_{aS} = \frac{\Phi}{2h_{aS}\, l_S\, k_c}, \tag{5-19}$$

где l_S — длина пакета статора; $l_S = l$.

В современных машинах малой мощности индукция в ярме статора $B_{aS} = 12\,000 \div 19\,000$ *гс*. Эта индукция тем больше, чем меньше число полюсов. Для статоров двухполюсных машин при $B_{aS} > 14\,000$ *гс* для стали Э11 и Э12 $H_{aS} = f(B_{aS} - 4\,000)$.

В формуле (5-18) ξ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения индукции в ярме. Этот коэффициент находится по кривой $\xi = f(B_{aS})$ (рис. 5-1).

Магнитное напряжение ярма ротора

$$F_{aR} = \xi H_{aR} \frac{\pi (d_{\text{вала}} + h_{aR})}{2p}. \quad (5\text{-}20)$$

Напряженность магнитного поля H_{aR} определяется по индукции B_{aR}:

$$B_{aR} = \frac{\Phi}{2h_{aR}\, l_R k_c}, \quad (5\text{-}21)$$

где l_R — длина пакета ротора;
ξ находится по кривой $\xi = f(B_{aR})$ (рис. 5-1);
h_{aR} — высота ярма ротора:

$$h_{aR} = \frac{D - 2\delta - \frac{5}{6} d_{\text{вала}}}{2} - h_{zR}, \quad (5\text{-}22)$$

где $d_{\text{вала}}$ — диаметр вала;
h_{zR} — расчетная высота зубца.

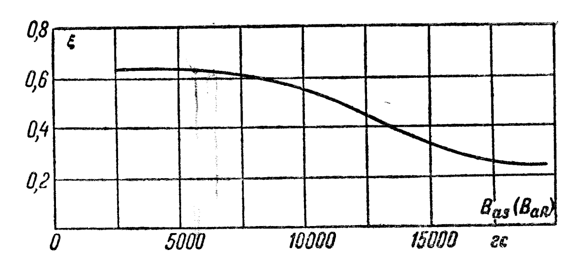


Рис 5-1. К определению магнитного напряжения ярма статора и ротора $\xi = f(B_{aS})$, $\xi = f(B_{aR})$.

Для круглого паза (см. рис. 3-6, *а* и *б*)

$$h_{zR} = h_{пR} - 0,1 d_R; \quad (5\text{-}23)$$

для паза с полукруглым дном (рис. 3-6, *в* и *г*)

$$h_{zR} = h_{пR} - 0,1 d_{2R}. \quad (5\text{-}24)$$

Индукция в ярме ротора для двигателей единой серии $B_{aR} = 10\,000 - 19\,000$ *гс*.

Коэффициент насыщения определяется по формуле

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{zS} + F_{zR}}{F_\delta}. \quad (5\text{-}25)$$

По найденному значению коэффициента насыщения и рис. 2-18 проверяются предварительно выбранные α_δ и k_B.

В случае больших расхождений значения индукции в воздушном зазоре и зубцах статора B_{ZS} и ротора B_{ZR}, а также магнитные напряжения F_δ, F_{ZS} и F_{ZR} пересчитываются.

Следует иметь в виду, что у малошумных машин значения индукции в зубцах и ярмах статора и ротора не должны превышать соответствующих величин:

$$B_Z \leqslant 13\,000 \text{ гс и } B_a \leqslant 10\,000 \text{ гс}.$$

Реактивная составляющая тока холостого хода, найденная в результате расчета магнитной цепи по значению намагничивающего тока [см. формулы (5-2) и (5-4)], должна быть меньше расчетного номинального тока $I_н$, определенного по (2-17) или (2-18) (примерно $I_{0r} = 0{,}6 \div 0{,}8 I_н$).

В случае, если окажется, что $I_{0r} \geqslant I_н$, необходимо произвести пересчет магнитной цепи, уменьшив индукцию в воздушном зазоре B_δ, а иногда изменяя сооотношение размеров отдельных участков магнитной цепи.

Индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре, рассчитывается по формуле

$$x_m = \frac{E_н}{I_\mu} = \frac{k_E\,U_н}{I_\mu}. \tag{5-26}$$

Определение коэффициента k_E рассматривается в § 2-3.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ

При работе асинхронных микродвигателей, так же как и в нормальных машинах, возникают четыре вида потерь:

1) потери в стали статора и ротора;
2) электрические потери в обмотках;
3) механические потери;
4) добавочные потери.

Основные методы расчета отдельных потерь в микродвигателях мало чем отличаются от метода расчета потерь в нормальных машинах [Л. 1]. Специфическими для микромашин вопросами при расчете потерь в микромашинах являются:

1) наличие полей прямой и обратной последовательно-

стей у однофазных машин, учитываемое при расчете потерь в стали;

2) большое влияние на величину отдельных потерь качества технологической обработки деталей, механической сборки микромашин; при расчете потерь технологические факторы учитываются с помощью коэффициентов обработки, величина которых колеблется в широких пределах.

Отсутствие достаточного количества опытных данных по потерям микродвигателей, выпускаемых в Союзе и за границей, не позволяет в настоящее время дать точные рекомендации по расчету потерь. Формулы, учитывающие влияние технологических факторов, подлежат дальнейшему уточнению.

6-1. ПОТЕРИ В СТАЛИ

Потери в стали представляют собой сумму потерь в стали ярма и зубцов статора и потерь в стали ярма и зубцов ротора:

$$P'_{\text{c}} = P'_{\text{c}\,S} + P'_{\text{c}\,R} = P'_{\text{ca}\,S} + P'_{\text{c}\,ZS} + P'_{\text{ca}\,R} + P'_{\text{c}\,ZR}, \qquad (6\text{-}1)$$

где $P'_{\text{c}\,S} = P'_{\text{ca}\,S} + P'_{\text{c}\,ZS}$ — потери в стали статора, *вт*;

$P'_{\text{c}\,R} = P'_{\text{ca}\,R} + P'_{\text{c}\,ZR}$ — потери в стали ротора, *вт*.

Потери в стали определяются величинами индукции и частоты, которые могут меняться для различных режимов.

Удобно вначале определить так называемые расчетные потери, отнесенные к определенным индукции и частоте. Обычно расчетные потери в стали статора и ротора определяют по индукциям, найденным при расчете магнитной цепи, для предварительно принятого k_E и частоты сети f.

Расчетные потери в ярме статора и ротора

$$P'_{\text{ca}} = 1{,}6 p_{10/50} \left(\frac{B_{\text{a}}}{10^4}\right)^2 G_{\text{a}} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}, \qquad (6\text{-}2)$$

где $P_{10/50}$ — удельные потери в стали, *вт/кг*, по табл. 6-1;

B_{a} — расчетная индукция в ярме статора или ротора [см. формулы (5-19) и (5-21)];

f — частота перемагничивания;

G_{a} — расчетный вес ярма для статора, *кг*;

$$G_{\text{a}} = 7{,}8\pi (D_{\text{a}} - h_{\text{a}S}) h_{\text{a}S} l k_{\text{c}} \cdot 10^{-3}; \qquad (6\text{-}3)$$

для ротора

$$G_{\text{a}} = 7{,}8\pi (d_{\text{в}} + h_{\text{a}R}) h_{\text{a}R} l k_{\text{c}} \cdot 10^{-3}, \qquad (6\text{-}4)$$

Таблица 6-1

Удельные потери в стали при частоте $f = 50$ гц и максимальной индукции 10 000 гс

Марка стали		Э11	Э12	Э21	Э31	Э41	Э42	Э43
Толщина листа, *мм*	0,5	3,3	2,8	2,5	2,0	1,6	1,4	1,25
	0,35	—	—	—	1,65	1,35	1,2	1,05

где $D_а$ — наружный диаметр статора;
$d_в$ — внутренний диаметр ротора;
$h_а$ — расчетная высота ярма;
l — длина статора (ротора);
$k_с$ — коэффициент заполнения пакета сталью (см. табл. 5-1).

Расчетные потери в зубцах статора и ротора

$$P'_{cz} = 1{,}8 p_{10/50} \left(\frac{B_z}{10^4}\right)^2 G_z \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} k_т, \tag{6-5}$$

где $p_{10/50}$ — удельные потери по табл. 6-1;
B_z — расчетная индукция в зубце статора или ротора, *гс* [см. формулы (5-8), (5-9) и (5-13)];
G_z — расчетный вес зубцов, *кг*:

$$G_z = 7{,}8 Z b_z h_z l k_с \cdot 10^{-3}, \tag{6-6}$$

где Z — число зубцов статора или ротора;
b_z — расчетная ширина зубца;
h_z — расчетная высота зубца;
$k_т$ — коэффициент обработки (по табл. 6-2).

Таблица 6-2

Коэффициенты обработки $k_т$

Обработка статора	Листы неизолированные неотожженные	Листы изолированные (бумага, лак) неотожженные	Листы изолированные (оксидировка) отожженные
Не обработан. . . .	1,1	0,9	0,8
Шлифовка	1,2	1,0	0,9
Обточка	1,5	1,2	1,1

При расчете рабочих характеристик двигателя потери в стали для каждой точки следует рассчитывать с учетом действительной индукции и частоты токов ротора ($f_R = sf$).

Для однофазных микродвигателей действительные потери в стали статора и ротора складываются из потерь в стали прямой P_{cS1} (P_{cR1}) и обратной P_{cS2} (P_{cR2}) последовательностей:

для статора

$$P_{cS} = P_{cS1} + P_{cS2}; \qquad (6\text{-}7)$$

для ротора

$$P_{cR} = P_{cR1} + P_{cR2}. \qquad (6\text{-}8)$$

Составляющие потерь в стали прямой и обратной последовательностей в любом режиме работы двигателя рассчитываются по следующим соотношениям:

Потери в стали статора прямой последовательности

$$P_{cS1} = P'_{cS} \left(\frac{E_1}{U_н k_E}\right)^2, \qquad (6\text{-}9)$$

где P'_{cS} — расчетные потери в стали по (6-2) и (6-6);

$E_1 = I_{A1} z'_{RA1}$ — э. д. с. прямой последовательности в заданном режиме;

I_{A1} — ток прямой последовательности по (9-1);

z'_{RA1} — сопротивление разветвления прямой последовательности по (7-2).

Потери в стали статора обратой последовательности

$$P_{cS2} = P'_{cS} \left(\frac{E_2}{U_н k_E}\right)^2, \qquad (6\text{-}10)$$

где $E_2 = I_{A2} z'_{RA2}$ — э. д. с. обратной последовательности в заданном режиме;

I_{A2} — ток обратной последовательности по (9-2);

z'_{RA2} — сопротивление разветвления обратной последовательности по (7-8).

Потери в стали ротора прямой последовательности

$$P_{cR1} = P'_{cR} \left(\frac{E_1}{U_н k_E}\right)^2 s^{1,3}. \qquad (6\text{-}11)$$

Потери в стали ротора обратной последовательности

$$P_{cR1} = P'_{cR}\left(\frac{E_2}{U_н k_E}\right)^2 (2 - s)^{1,3}, \qquad (6\text{-}12)$$

где P'_{cR} — расчетные потери в стали ротора по (6-2) — (6-6);

s — скольжение заданного режима;

E_1 и E_2 — э. д. с. прямой и обратной последовательностей.

6-2. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ В СТАЛИ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА В СТАТОРЕ

Влияние потерь в стали на характеристики двигателя учитывается с помощью введения добавочного тока, обусловленного этими потерями. Этот ток добавляется к активной составляющей тока статора. Значениями токов с учетом потерь в стали пользуются для определения потерь в меди статора, потерь в пусковом элементе, при вычислении напряжения на пусковом элементе и определении коэффициента мощности. Все остальные величины вычисляются без учета потерь в стали.

Для кругового вращающегося магнитного поля добавочный ток от потерь в стали равен:

$$I'_{Ac} = \frac{P_{cS}}{mE}. \qquad (6\text{-}13)$$

Для эллиптического вращающегося магнитного поля добавочный ток от потерь в стали прямой последовательности в главной фазе

$$I'_{A1c} = \frac{P_{cS1} + P_{cR1}}{2E_1}; \qquad (6\text{-}14)$$

добавочный ток от потерь в стали прямой последовательности во вспомогательной фазе

$$I'_{B1c} = \frac{I'_{A1c}}{k}; \qquad (6\text{-}15)$$

добавочный ток от потерь в стали обратной последовательности в главной фазе

$$I'_{A2c} = \frac{P_{cS2} + P_{cR2}}{2E_2}; \qquad (6\text{-}16)$$

добавочный ток от потерь в стали обратной последовательности во вспомогательной фазе

$$I'_{B2c} = \frac{I'_{A2c}}{k}. \qquad (6\text{-}17)$$

Для пульсирующего поля добавочный ток от потерь в стали прямой последовательности

$$I'_{A1c} = \frac{P_{cS1} + P_{cR1}}{E_1}; \qquad (6\text{-}18)$$

добавочный ток от потерь в стали обратной последовательности

$$I'_{A2c} = \frac{P_{cS2} + P_{cR2}}{E_2}. \qquad (6\text{-}19)$$

6-3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Точный расчет механических потерь в электрических машинах встречает трудности. На заводах при расчете этих потерь пользуются чаще всего опытными данными, полученными при испытании машин, построенных на данном предприятии. Расчетные формулы для механических потерь являются эмпирическими. Отсутствие в настоящее время достаточного количества опытных данных для асинхронных микродвигателей еще в большей мере, чем у нормальных машин, осложняет расчет механических потерь у этой группы электрических машин.

При расчете механических потерь асинхронных машин мощностью >100 *вт* можно воспользоваться следующими эмпирическими формулами, полученными для машин средней мощности. Для машин с радиальной вентиляцией (без радиальных каналов, с лопатками на торцах ротора)

$$P_{\text{мех}} = k\left(\frac{n}{100}\right)^2\left(\frac{D_a}{100}\right)^3, \qquad (6\text{-}20)$$

где D_a — наружный диаметр статора, *мм*; для $2p=2$ $k=5$; для $2p>2$ $k=6$.

Для машин с аксиальной вентиляцией (центробежный вентилятор)

$$P_{\text{мех}} = 0{,}65\left(\frac{n}{1\,000}\right)^2\left(\frac{D_a}{100}\right)^4. \qquad (6\text{-}21)$$

Для машины с внешним обдувом (центробежный вентилятор)

$$P_{\text{мех}} = k\left(\frac{n}{1\,000}\right)^2\left(\frac{D_{\text{a}}}{100}\right)^4, \quad (6\text{-}22)$$

где $k = 1{,}3\left(1 - \frac{D_{\text{a}}}{1\,000}\right)$ для $2p = 2$; $k = 1$ для $2p > 2$; $D_{\text{a}} > 100$ *мм*.

Формулы (6-20)—(6-22) нуждаются в дальнейшем уточнении применительно к микромашинам.

6-4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Электрические потери рассчитываются в обмотках статора, ротора и в пусковых элементах.

В зависимости от характера поля в машине (эллиптическое, круговое, пульсирующее) электрические потери рассчитываются по различным формулам. Эллиптическое поле имеет место в конденсаторных двигателях и при пусковом режиме однофазного двигателя с пусковыми элементами, круговое — в трехфазных двигателях и обычно при номинальном режиме конденсаторного двигателя, пульсирующее—при рабочем режиме однофазного двигателя с пусковыми элементами.

В общем случае при наличии вращающегося эллиптического поля в однофазных двигателях с двумя обмотками на статоре потери в меди статора равны:

$$P_{\text{м}S} = I_{SA}^2 r_{SA} + I_{SB}^2 r_{SB}, \quad (6\text{-}23)$$

где I_{SA} и I_{SB} — токи в главной и вспомогательной обмотках с учетом потерь в стали;

r_{SA} и r_{SB} — активные сопротивления главной и вспомогательной обмоток.

В частных случаях электрические потери в обмотке статора равны:

1) при круговом поле

$$P_{\text{м}S} = mI_{SA}^2 r_{SA}; \quad (6\text{-}24)$$

2) при пульсирующем поле

$$P_{\text{м}S} = I_{SA}^2 r_{SA}. \quad (6\text{-}25)$$

В общем случае при вращающемся эллиптическом поле, когда токи прямой и обратной последовательностей не

равны, электрические потери в обмотке ротора определяются как

$$P_{мR} = 2(I_{RA1}^2 + I_{RA}^2) r_{RA}, \qquad (6\text{-}26)$$

где I_{RA1} и I_{RA2} — токи прямой и обратной последовательностей в роторе;
r_{RA} — сопротивление ротора.

Удобнее при расчете потерь в обмотке ротора оперировать со статорными токами. Так как для принятых нами схем замещения (рис. 7-1)

$$I_{RA1}^2 r_{RA} = I_{A1}^2 r'_{RA1} s;$$

$$I_{RA2}^2 r_{RA} = I_{A2}^2 r'_{RA2} (2 - s),$$

то формула для электрических потерь в роторе примет вид:

$$P_{мR} = 2I_{A1}^2 r'_{RA1} s + 2I_{A2}^2 r'_{RA2} (2 - s), \qquad (6\text{-}27)$$

где I_{A1} и I_{A2} — токи прямой и обратной последовательностей в статоре;
r'_{RA1} и r'_{RA2} — активные сопротивления разветвления.

При круговом вращающемся поле электрические потери в обмотке ротора можно определить по формуле

$$P_{мR} = mI_A^2 r_{RA} s. \qquad (6\text{-}28)$$

При пульсирующем поле $I_{A1} = I_{A2} = I_A/2$ и потери в обмотке ротора равны:

$$P_{мR} = \frac{1}{2} I_A^2 [r'_{RA1} s + r'_{RA2} (2 - s)]. \qquad (6\text{-}29)$$

Потери в пусковом сопротивлении

$$P_п = I_{SB}^2 r_п, \qquad (6\text{-}30)$$

где $r_п$ — пусковое сопротивление.

Потери в конденсаторе

$$P_к = I_{SB}^2 r_C, \qquad (6\text{-}31)$$

где r_C — сопротивление конденсатора, эквивалентное потерям в диэлектрике.

6-5. ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ

Добавочные потери в асинхронных микродвигателях трудно поддаются учету. Для приближенного учета этих потерь можно пользоваться тем же соотношением, что и для нормальных машин:

$$P_{доб}=0,005\,\frac{P_{н}}{\eta}, \qquad (6\text{-}32)$$

где η — коэффициент полезного действия.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ГЛАВНОЙ ФАЗЫ

Расчет характеристик однофазных асинхронных микродвигателей основан на использовании метода симметричных составляющих применительно к двухфазным системам [Л. 13].

В соответствии с этим методом для однофазных машин применяются схемы замещения, изображенные на рис. 7-1 и 7-2.

Схема замещения главной фазы (рис. 7-1) состоит из двух отдельных схем соответственно для токов прямой и обратной последовательностей.

Схема, изображенная на рис. 7-1, применяется как для однофазных с пусковым элементом, так и для конденсаторных машин. Вторая схема замещения (рис. 7-2) применяется для чисто однофазных машин с отключенной вспомогательной фазой. Она объединяет обе схемы. При этом параметры, соответствующие прямой и обратной последовательностям, делятся пополам, так как в этом случае полный ток фазы I_A в два раза больше равных токов прямой и обратной последовательностей.

Для трехфазных машин применима схема замещения только для токов прямой последовательности.

В рассматриваемых схемах замещения (рис. 7-1 и 7-2) $Z_{SA}=r_{SA}+jx_{SA}$ — полное сопротивление обмотки статора, а r_{SA} — активное сопротивление по (4-1); x_{SA} — реактивное сопротивление рассеяния по (4-4).

Намагничивающая ветвь в схеме замещения включает только индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре. Оно рассчитывается по (5-26).

Потери в стали учитываются добавочным током (см. § 6-2).

Цепь ротора содержит индуктивное сопротивление рассеяния ротора x_{RA} и активное сопротивление ротора соответственно для прямой последовательности $\frac{r_{RA}}{s}$ и для обратной последовательности $\frac{r_{RA}}{2-s}$ (s — скольжение). Сопротивления r_{RA} и x_{RA} рассчитываются по формулам (4-20)—(4-31).

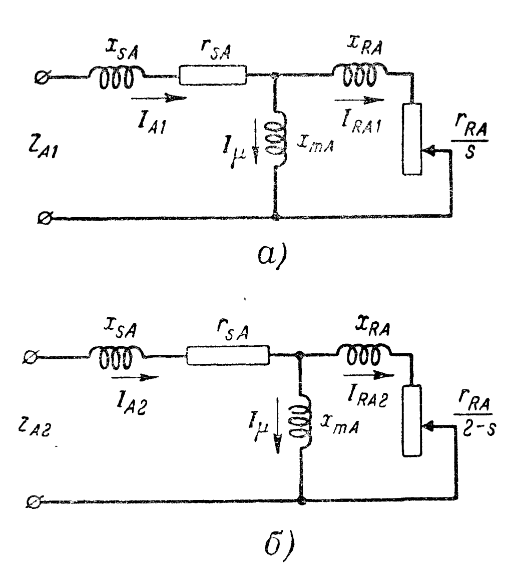


Рис. 7-1. Схемы замещения главной фазы.
а — для токов прямой последовательности; *б* — для токов обратной последовательности.

Сопротивления x_{mA}, x_{RA} и r_{RA} приведены к числу витков главной фазы A.

Полное сопротивление прямой последовательности фазы A (рис. 7-1)

$$Z_{A1} = Z_{SA} + Z'_{RA1} = r_{A1} + jx_{A1} \tag{7-1}$$

содержит сопротивление обмотки статора Z_{SA} и сопротивление разветвления, т. е. сопротивление цепи, состоящей из параллельно включенных намагничивающего контура и цепи ротора.

Сопротивление разветвления для прямой последовательности

$$Z'_{RA1}=r'_{RA1}+jx'_{RA1}, \qquad (7\text{-}2)$$

где активное сопротивление разветвления

$$r'_{RA1}=\frac{x_m^2\frac{r_{RA}}{s}}{\left(\frac{r_{RA}}{s}\right)^2+(x_{mA}+x_{RA})^2}; \qquad (7\text{-}3)$$

индуктивное сопротивление разветвления

$$x'_{RA1}=\frac{x_{mA}\left(\frac{r_{RA}}{s}\right)^2+x_{mA}x_{RA}(x_{mA}+x_{RA})}{\left(\frac{r_{RA}}{s}\right)^2+(x_{mA}+x_{RA})^2}. \qquad (7\text{-}4)$$

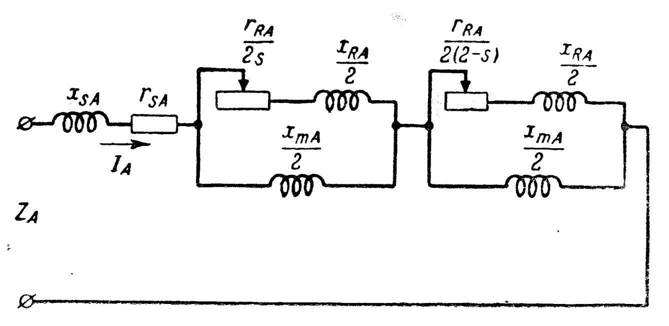


Рис. 7-2. Схема замещения главной фазы (при отключенной пусковой фазе).

Для упрощения расчетов можно преобразовать формулы (7-3) и (7-4), введя отношения параметров α и β:

$$r'_{RA1}=\frac{\alpha\beta x_{mA}s}{\alpha^2+s^2}; \qquad (7\text{-}5)$$

$$x'_{RA1}=\beta x_{RA}\frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}}\alpha+s^2}{\alpha^2+s^2}, \qquad (7\text{-}6)$$

где $\alpha=\frac{r_{RA}}{x_{mA}+x_{RA}}$; $\beta=\frac{x_{mA}}{x_{mA}+x_{RA}}$.

Полное сопротивление обратной последовательности фазы A

$$Z_{A2} = Z_{SA} + Z'_{RA2} = r_{A2} + jx_{A2}, \qquad (7\text{-}7)$$

где сопротивление разветвления для обратной последовательности

$$Z'_{RA2} = r'_{RA2} + jx'_{RA2}. \qquad (7\text{-}8)$$

Активное r'_{RA2} и индуктивное x'_{RA2} сопротивления разветвления обратной последовательности рассчитываются по формулам (7-3)—(7-6) с подстановкой вместо s скольжения $2-s$.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ
РАСЧЕТ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ФАЗЫ

8-1. ОБЩИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Параметры вспомогательной фазы однофазного асинхронного микродвигателя определяют пусковые свойства машины, а для конденсаторных двигателей — и рабочие свойства.

Расчет вспомогательной фазы состоит в определении параметров вспомогательной обмотки и выборе добавочного элемента (конденсатора, сопротивления) [Л. 10 и 36].

Как известно, добавочный элемент однофазного двигателя может служить как для целей пуска в двигателях с отключаемой пусковой фазой (рис. 8-1,*а* и *б*), так и для улучшения рабочих свойств машины, например в конденсаторных двигателях (рис. 8-1,*в*).

Задача расчета вспомогательной фазы для всех типов однофазных двигателей сводится к определению следующих величин:

1) коэффициента трансформации, равного отношению чисел эффективных витков вспомогательной и главной обмоток:

$$k = \frac{w_{эB}}{w_{эA}} = \frac{k_{0B}w_B}{k_{0A}w_A}, \qquad (8\text{-}1)$$

где w_A и w_B — числа витков главной и вспомогательной обмоток;

k_{0A}, k_{0B} — обмоточные коэффициенты;

2) оптимальной величины добавочного элемента:

а) емкости рабочего конденсатора $C_р$ (или емкости $C_р$

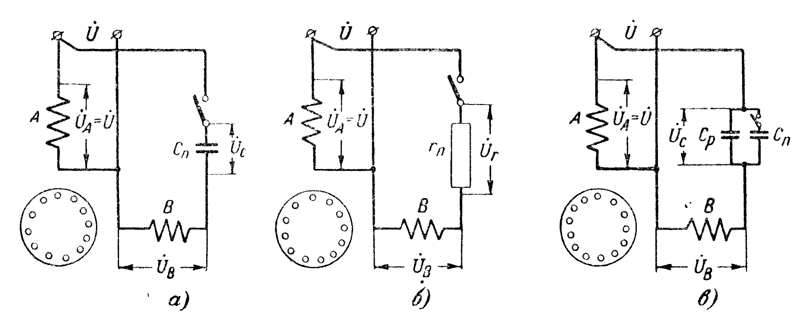


Рис. 8-1. Схемы включения однофазных двигателей.
а — с пусковой емкостью; *б* — с пусковым сопротивлением; *в* — с рабочей и пусковой емкостями.

и добавочного сопротивления) для конденсаторного двигателя;

б) емкости пускового конденсатора $C_п$ для двигателей с пусковой емкостью или конденсаторного с пусковой и рабочей емкостями;

в) пускового сопротивления $r_п$ для однофазного двигателя с пусковым сопротивлением.

Коэффициент трансформации дает возможность найти активное и реактивное сопротивления вспомогательной фазы, число витков, сечение провода и величину тока в фазе.

Правильный выбор коэффициента трансформации и емкости рабочего конденсатора обеспечивает оптимальный режим работы конденсаторного двигателя, т. е. позволяет получить круговое поле при номинальной или заданной нагрузке (заданном скольжении).

Рационально выбранные коэффициент трансформации и пусковые элементы у однофазных двигателей с отключаемой пусковой фазой обеспечивают требуемые пусковые характеристики двигателя.

При расчете вспомогательной фазы однофазного двигателя параметры главной фазы r_{SA}, x_{SA}, r_{RA}, x_{RA}, x_{mA} считаются известными (см. гл. 4). Они могут быть несколько изменены при окончательном расчете вспомогательной фазы.

8-2. СОПРОТИВЛЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ

Активное r_{SB} и индуктивное x_{SB} сопротивления вспомогательной обмотки могут быть выражены через сопротивления главной обмотки и некоторый коэффициент приведения.

В симметричной однофазной машине одинаковы числа пазов, занимаемых каждой фазой, конфигурация обмоток фаз, форма и размеры всех пазов. К таким машинам следует отнести конденсаторный двигатель. В этом случае индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора пропорциональны квадратам действительных чисел витков, так как магнитные проводимости рассеяния Λ_A и Λ_B равны:

$$\frac{x_{SB}}{x_{SA}} = \frac{\Lambda_B}{\Lambda_A}\left(\frac{w_B}{w_A}\right)^2, \tag{8-2}$$

т. е. индуктивное сопротивление вспомогательной фазы равно:

$$x_{SB} = k^2 x_{SA}. \tag{8-3}$$

Если в симметричной машине общее сечение меди во всех пазах одинаково, т. е. сечение провода обмоток обратно пропорционально числу витков, то активное сопротивление вспомогательной фазы может быть также выражено через сопротивление главной фазы и квадрат коэффициента трансформации:

$$r_{SB} = \rho\frac{l_w w_{эB}}{s_B k_{oB}} = \rho\frac{l_w k w_{эA}}{\frac{s_A}{k} k_{oA}} = \rho k^2 \frac{l_w w_{эA}}{s_A k_{oA}} = k^2 r_{SA}. \tag{8-4}$$

Сечение провода обмотки B может отличаться от сечения провода обмотки A не в k, а в t раз. В таком случае активное сопротивление обмотки B будет равно:

$$r_{SB} = \rho\frac{l_w k w_{эA}}{\frac{Q_A}{t} k_{oA}} = ktr_{SA}. \tag{8-5}$$

В общем случае числа пазов, занимаемых главной и вспомогательной обмотками, могут быть различными:

$$Q_A = aQ_B.$$

Например, в двигателях с пусковыми элементами отношение $\frac{Q_A}{Q_B} = 2$. Магнитные проводимости рассеяния фаз в этом случае обратно пропорциональны числам пазов, занимаемых фазами:

$$\frac{\Lambda_B}{\Lambda_A} = \frac{Q_A}{Q_B}.$$

В таком случае индуктивное сопротивление рассеяния обмотки B

$$x_{sB}=k^2a\left(\frac{k_{оA}}{k_{оB}}\right)^2 x_{sA}. \tag{8-6}$$

Отношение сечения провода в обмотках можно считать равным

$$S_A:S_B=\frac{S'_п Z_A}{w_A}:\frac{S'_п Z_B}{w_B}=\frac{S'_п Q_A 2pk_{оA}}{w_{эA}}:\frac{S'_п Q_B 2pk_{оB}}{w_{эB}}=$$

$$=ka\frac{k_{0A}}{k_{0B}},$$

где $S'_п$ — площадь паза без изоляции;

Z_A и Z_B — числа пазов, приходящиеся на фазы A и B.

Активное сопротивление обмотки B в этом случае

$$r_{sB}=\rho\frac{l_w w_{эB}}{S_B k_{0B}}=\rho\frac{l_w k w_A}{\frac{S_A}{k_a}\cdot\frac{k^2_{оB}}{k^2_{оA}}}=\rho\frac{l_w k\frac{w_{эA}}{k_{оA}}}{\frac{S_A}{k_a}\frac{k^2_{оB}}{k^2_{оA}}}=$$

$$=k^2a\left(\frac{k_{0A}}{k_{оB}}\right)^2 r_{sA}. \tag{8-7}$$

У двигателей с пусковыми элементами $C_п$ и $r_п$ сечение провода вспомогательной обмотки выбирается обычно меньшим, чем сечение провода главной обмотки, так как в ней можно допустить бо́льшую плотность тока.

Тогда при $Q_A=aQ_B$ сечение провода в фазе B отличается в $ta\frac{k_{оA}}{k_{оB}}$ раз и активное сопротивление вспомогательной обмотки

$$r_{sB}=kta\left(\frac{k_{оA}}{k_{оB}}\right)^2 r_{sA}. \tag{8-8}$$

8-3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ И ФАЗОСДВИГАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Конденсаторный двигатель является наиболее использованным однофазным двигателем, так как обе его обмотки участвуют в пуске и работе.

Наличие емкости во вспомогательной фазе статорной обмотки снижает шумность двигателя.

Различают конденсаторные двигатели:

а) с одной рабочей емкостью $C_р$ (рис. 8-2,*а*);

б) с рабочей $C_р$ и пусковой $C_п$ емкостями.

Если по условиям применения двигателя не требуется высоких пусковых моментов, то могут быть применены конденсаторные двигатели с одной рабочей емкостью и отпадает необходимость в дополнительном пусковом устройстве для отключения пускового конденсатора.

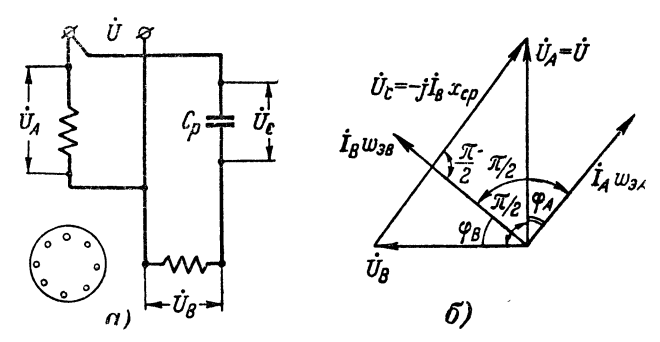


Рис. 8-2. Конденсаторный двигатель с одной рабочей емкостью.

а — схема включения; *б* — векторная диаграмма при круговом поле.

Коэффициент трансформации для конденсаторного двигателя определяется из условия получения кругового вращающегося поля при номинальной (или заданной) нагрузке.

В общем случае обмотки конденсаторного двигателя могут быть смещены в пространстве на произвольный угол, и круговое вращающееся поле получается включением во вспомогательную фазу либо только конденсатора, либо конденсатора и активного сопротивления. Наиболее распространен случай, когда обмотки сдвинуты в пространстве на 90°, а фазосдвигающим элементом является конденсатор. Этот случай мы рассмотрим подробно. Для остальных случаев: 1) произвольного сдвига обмоток в пространстве и фазосдвигающего элемента в виде конденсатора; 2) сдвига обмоток в пространстве на 90° и применения в качестве фазосдвигающего элемента конденсатора

и добавочного активного сопротивления приводим формулы без вывода [Л. 24].

Условия получения кругового вращающегося поля в двигателе, у которого обмотки смещены в пространстве на угол 90°, могут быть записаны так:

$$j\dot{I}_A w_{эA} = \dot{I}_B w_{эB} \tag{8-9}$$

и

$$j\dot{U}_A = \dot{U}'_B \frac{w_{эA}}{w_{эB}}. \tag{8-10}$$

Условия получения кругового поля иллюстрируются векторной диаграммой на рис. 8-2,*б*. Равенство (8-9) показывает, что н. с. фаз должны быть одинаковыми по величине и смещены во времени на 90°. Из равенства (8-10) видно, что значения напряжений, приведенных к числу витков одной из фаз, должны быть одинаковыми, а векторы напряжений должны быть смещены во времени на угол 90°.

Приравнивая нулю выражение для тока обратной последовательности однофазного двигателя

$$\dot{I}_{A2} = \dot{U}_A \frac{Z_{B1} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}},$$

получаем:

$$Z_{B1} + jkZ_{A1} = 0, \tag{8-11}$$

где

$$Z_{B1} = k^2 Z_{A1} + Z_C = (k^2 r_{A1} + r_C) + j\,(k^2 x_{A1} - x_C);$$

r_C и x_C — активное и реактивное сопротивления конденсатора.

Подставляя Z_{B1} в (8-11), получаем:

$$k^2 Z_{A1} + Z_C + jkZ_{A1} = (k^2 r_{A1} + r_C - kx_{A1}) + $$
$$+ j\,(k^2 x_{A1} - x_C + kr_{A1}) = 0. \tag{8-12}$$

Это равенство справедливо, если главная и вспомогательная фазы занимают одинаковое число пазов, и коэффициенты заполнения пазов медью одинаковы, что практически и имеет место в конденсаторных двигателях.

Разделив выражение (8-12) на действительную и мнимую части, получаем:

$$k^2 r_{A1} + r_C - kx_{A1} = 0; \tag{8-13}$$

$$k^2 x_{A1} - x_C + kr_{A1} = 0. \tag{8-14}$$

Из уравнения (8-13) находим коэффициент трансформации конденсаторного двигателя:

$$k = \frac{x_{A1} + \sqrt{x_{A1}^2 - 4r_{A1}r_C}}{2r_{A1}}, \qquad (8\text{-}15)$$

где r_{A1} и x_{A1} — активное и индуктивное сопротивления схемы замещения прямой последовательности для главной фазы при $s = s_н$ (или любом заданном s).

Активным сопротивлением конденсатора следует предварительно задаваться. После расчета рабочего конденсатора сопротивление уточняется по каталогу. В случае больших расхождений каталожной величины r_C с принятой предварительно производится пересчет.

Формула (8-15) может быть значительно упрощена, если принять $r_C = 0$:

$$k = \frac{x_{A1}}{r_{A1}} = \operatorname{tg} \varphi_A, \qquad (8\text{-}16)$$

где φ_A — угол сдвига фаз между током и напряжением главной фазы.

Емкость рабочего конденсатора при круговом поле может быть найдена из уравнения (8-14):

$$x_{Cp} = k^2 x_{A1} + k r_{A1} = (k^2 + 1)\, x_{A1} \ \text{ом}. \qquad (8\text{-}17)$$

Из равенства (8-17) видно, что при круговом поле реактивное сопротивление конденсатора должно быть равно сумме индуктивных сопротивлений обеих обмоток:

$$x_{Cp} = k^2 x_{A1} + x_{A1} = x_{B1} + x_{A1} \ \text{ом}. \qquad (8\text{-}18)$$

Емкость рабочего конденсатора

$$C_p = \frac{10^6}{2\pi f x_{Cp}} \ [\text{мкф}],$$

где x_{Cp} — реактивное сопротивление конденсатора, *ом*.

Емкость конденсатора округляется до ближайшего значения по каталогу, из которого берется также значение активного сопротивления конденсатора.

Если главная и вспомогательная фазы занимают одинаковое число пазов, но отношение сечений меди провода главной и вспомогательной обмоток $\frac{s_A}{s_B} \neq k$, то коэффи-

циент трансформации (при $r_C \approx 0$) определится из уравнения, аналогичного уравнению (8-13), по формуле

$$k = \frac{x_{A1} - tr_{sA}}{r'_{RA1}}, \qquad (8\text{-}19)$$

где $t = \frac{s_A}{s_B}$ — отношение сечений провода в главной и вспомогательной обмотках.

Реактивное сопротивление конденсатора в этом случае определяется по (8-17), а значение коэффициента трансформации — по (8-19).

В самом общем случае, если главная и вспомогательная фазы занимают разное число пазов, коэффициент трансформации (при $r_c \approx 0$) определяется по формуле

$$k = \frac{x_{A1} - ta\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 r_{sA}}{r'_{RA1}}, \qquad (8\text{-}20)$$

где $a = \frac{Q_A}{Q_B}$; $\frac{s_A}{s_B} = ta\frac{k_{0A}}{k_{0B}}$.

Реактивное сопротивление конденсатора в этом случае определяется по формуле

$$x_{Cp} = k^2 (ax_{SA} + x'_{RA1}) + kr_{A1}, \qquad (8\text{-}21)$$

где коэффициент трансформации определяется по (8-20).

Получение кругового поля с помощью конденсатора при правильном выборе коэффициента трансформации по формулам (8-15), (8-19) и (8-20) не всегда возможно и экономически выгодно.

В тех случаях, когда получение кругового поля является обязательным по условиям работы (например, в двигателях звукозаписи, где требуются равномерность хода и отсутствие вибраций), оно может быть получено с помощью емкости и добавочного активного сопротивления.

При наличии во вспомогательной обмотке, кроме емкости, добавочного сопротивления (рис. 8-3) для создания кругового поля коэффициент трансформации, величина емкости и добавочное сопротивление могут быть найдены

на основе подбора по уравнениям (8-13) и (8-14); при этом в уравнении (8-13) добавляется слагаемое $r_д$:

$$k^2 r_{A1} - k x_{A1} + r_C + r_д = 0. \qquad (8\text{-}22)$$

При произвольном пространственном сдвиге обмоток на угол Θ° и включении во вспомогательную фазу рабочей емкости (рис. 8-4) для создания кругового поля необходимо, чтобы намагничивающие силы были равны по величине и сдвинуты во времени на угол ψ=180°—Θ°.

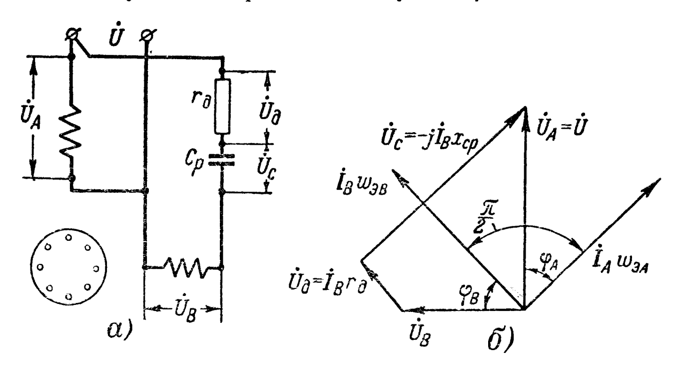


Рис. 8-3. Конденсаторный двигатель с рабочей емкостью и добавочным активным сопротивлением.
а — схема включения; *б* — векторная диаграмма при круговом поле.

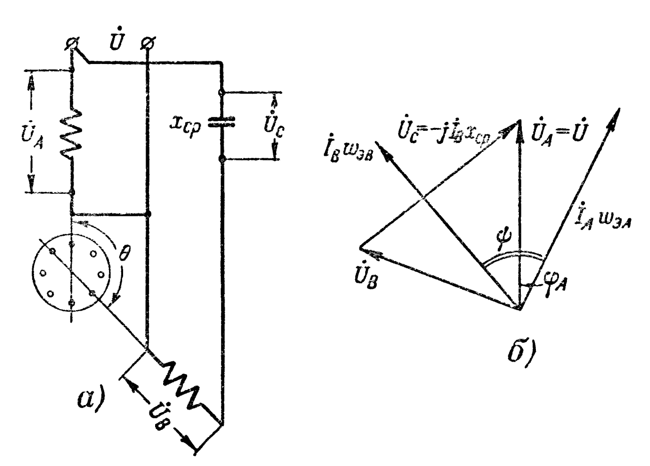


Рис. 8-4. Конденсаторный двигатель при произвольном пространственном сдвиге обмоток.
а — схема включения; *б* — векторная диаграмма при круговом поле.

Круговое поле будет иметь место при коэффициенте трансформации, равном

$$k = \frac{\cos(\Theta + \varphi_A)}{\cos \varphi_A}. \qquad (8\text{-}23)$$

Реактивное сопротивление конденсатора

$$x_{Cp} = -k^2 r_{A1} \operatorname{tg}(\Theta + \varphi_A) + k^2 x_{A1}, \qquad (8\text{-}24)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{x_{A1}}{r_{A1}}$.

Выбор пусковой емкости для конденсаторного двигателя с рабочей и пусковой емкостями рассматривается в следующем параграфе.

8-4. ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ И РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОДНОФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В однофазных двигателях с пусковыми элементами (с отключаемой пусковой обмоткой рис. 8-1,*а* и *б*) коэффициент трансформации k и величина пускового элемента (емкость $C_п$ или сопротивление $r_п$) должны прежде всего удовлетворять заданным условиям пуска (при $s = 1$):

1) получение максимального пускового момента $M_{к\,макс}$;

2) получение максимальной добротности $\left(\frac{M_к}{I_к}\right)_{макс}$;

3) получение заданной кратности пускового момента $m_к = \frac{M_к}{M_н}$;

4) получение заданной кратности пускового тока $i_к = \frac{I_к}{I_н}$.

Максимальная добротность получается при пусковом моменте, меньшем максимального, но при этом заметно снижается пусковой ток.

Требования к пусковым характеристикам устанавливаются в зависимости от того, какой из пусковых показателей является более существенным.

Условия получения максимального пускового момента и минимального пускового тока противоречивы.

На практике часто требуется получить возможно больший пусковой момент при ограниченной величине пускового тока.

При рациональном проектировании вспомогательной фазы представляют интерес два случая:

1) получение максимального момента при заданном пусковом токе;

2) получение максимальной добротности, т. е. наибольшего отношения пускового момента к пусковому току $\frac{M_к}{I_к}$, при заданном пусковом токе.

Таким образом, основными пусковыми показателями являются пусковой момент $M_к$ и пусковой ток $I_к$.

Пусковой момент однофазного двигателя, как известно, определяется следующей зависимостью:

$$M_к = \frac{97,4}{n_с} 2 (I_{A1к}^2 - I_{A2к}^2) r'_{RAк}, \quad (8\text{-}25)$$

где $I_{A1к}$ и $I_{A2к}$ — токи прямой и обратной последовательностей при пуске;

$r'_{RAк}$ — сопротивление разветвления фазы A при пуске ($s = 1$).

Эта зависимость может быть преобразована в следующее выражение в функции параметров схемы замещения [Л. 10]:

$$M_к = \frac{97,4 \cdot 2kU_A^2 r'_{RAк}}{n_с (r_{Aк}^2 + x_{Aк}^2)} \cdot \frac{r'_{Bк} x_{Aк} - x'_{Bк} r_{Aк}}{r'^{\,2}_{Bк} + x'^{\,2}_{Bк}} = 2A \frac{r'_{Bк} x_{Aк} - x'_{Bк} r_{Aк}}{r'^{\,2}_{Bк} + x'^{\,2}_{Bк}}, \quad (8\text{-}26)$$

где $A = \frac{97,4kU_A^2 r'_{RAк}}{n_с (r_{Aк}^2 + x_{Aк}^2)}$;

$U_A = U$.

Линейный пусковой ток в функции параметров схемы замещения главной и вспомогательной фаз равен:

$$I_к = I_{Aк} \sqrt{\frac{(r_{Aк} + r'_{Bк})^2 + (x_{Aк} + x'_{Bк})^2}{(r'_{Bк})^2 + (x'_{Bк})^2}}, \quad (8\text{-}27)$$

где $I_{Aк} = \frac{U}{\sqrt{r_{Aк}^2 + x_{Aк}^2}}$ — пусковой ток в фазе A.

В формулах (8-26) и (8-27) $r'_{Bк}$ и $x'_{Bк}$ — активное и реактивное сопротивления вспомогательной фазы, включая сопротивления пусковых элементов $x_{Cп}$ и $r_п$.

Сопротивление $x'_{Eк}$ для двигателей, у которых во вспомогательной фазе имеется емкость,— величина отрицательная и подставляется в указанные формулы со знаком минус.

Параметры, входящие в эти формулы, имеющие индекс Aк, представляют собой параметры схемы замещения главной фазы при пуске; $s=1$ (см. гл. 7):

$$r_{A1}=r_{A2}=r_{Aк};\quad x_{A1}=x_{A2}=x_{Aк};\quad r'_{RA1}=r'_{RA2}=r'_{RAк}.$$

На рис. 8-5 представлена векторная диаграмма, показывающая зависимость пускового тока от характера пускового

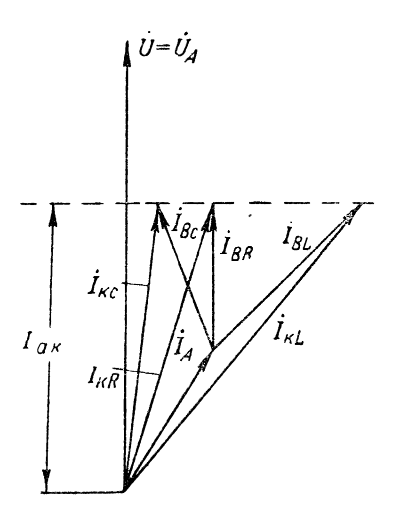


Рис. 8-5. Пусковые токи однофазных двигателей с различными пусковыми элементами (индуктивностью $L_п$, активным сопротивлением $r_п$ и емкостью $C_п$) при постоянном пусковом моменте ($M_к \equiv I_{ак}$).

элемента. Наименьший пусковой ток при заданном пусковом моменте $M_к \equiv I_{ак}=\mathrm{const}$ в однофазном двигателе получается при применении в качестве пускового элемента емкости. Применение в качестве фазосдвигающего добавочного элемента индуктивности приводит к наибольшему пусковому току. Поэтому индуктивность для указанных целей, как правило, не применяется.

Во вспомогательной обмотке для экономии меди можно допустить плотность тока в 3 — 4, а иногда и в 6 раз бо́льшую, чем в главной обмотке. При этом отношение

сечений провода главной и вспомогательной обмоток получается равным не $ka\frac{k_{0A}}{k_{0B}}$, а $ta\frac{k_{0A}}{k_{0B}}$, где $t > k$.

Увеличение плотности тока облегчает и удешевляет изготовление обмотки, так как даже при относительно большом значении k коэффициент заполнения паза не увеличивается.

Величина t принимается равной $(1{,}2 \div 1{,}5)\,k$, для двигателей с малым числом пусков — до $1{,}8k$.

В общем случае (см. § 8-2), когда главная и вспомогательная обмотки занимают неодинаковое число пазов ($Q_A \neq Q_B$) и отношение сечений провода обмоток $\frac{S_A}{S_B} = ta\frac{k_{0A}}{k_{0B}}$, сопротивления вспомогательной фазы при пуске могут быть выражены через сопротивления главной фазы следующим образом.

Активное сопротивление

$$r'_{B\text{к}} = kta\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 r_{SA} + k^2 r'_{RA\text{к}} + r_\text{п} = r_{B\text{к}} + r_\text{п}, \qquad (8\text{-}28)$$

где $r_\text{п}$ — добавочное сопротивление или активное сопротивление конденсатора r_C;

$a = \frac{Q_A}{Q_B}$;

$r_{B\text{к}}$ — активное сопротивление вспомогателной фазы при пуске.

Реактивное сопротивление

$$x'_{B\text{к}} = k^2 a\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 x_{SA} + k^2 x'_{RA\text{к}} - x_C = x_{B\text{к}} - x_C, \qquad (8\text{-}29)$$

где x_C — реактивное сопротивление конденсатора (только для двигателя с емкостью го вспомогательной фазе);

$x_{B\text{к}}$ — реактивное сопротивление фазы B при пуске.

Для частного случая, когда $t = k$ и $a = 1$, формулы (8-24) и (8-25) значительно упрощаются:

$$r'_{B\text{к}} = k^2 r_{SA} + k^2 r'_{RA\text{к}} + r_\text{п} = k^2 r_{A\text{к}} + r_\text{п} = r_{B\text{к}} + r_\text{п}; \qquad (8\text{-}30)$$

$$x'_{B\text{к}} = k^2 x_{SA} + k^2 x'_{RA\text{к}} - x_C = k^2 x_{A\text{к}} - x_C = x_{B\text{к}} - x_C. \qquad (8\text{-}31)$$

Расчетные формулы для определения величины пускового элемента при различных условиях пуска для двига-

телей с пусковой емкостью и пусковым сопротивлением могут быть получены из уравнений (8-26) и (8-27).

Для определения величины пускового элемента, обеспечивающего максимальный момент следует продифференцировать уравнение (8-26) либо по $x'_{Вк}$, либо по $r'_{Вк}$ и приравнять производную нулю.

Формулы для расчета величины пускового элемента, обеспечивающего максимальную добротность, могут быть выведены на основе круговой диаграммы пусковых токов однофазного двигателя [Л. 36].

Величины пусковых элементов для заданных кратностей пускового момента и пускового тока определяются по формулам, полученным из уравнений (8-26) и (8-27).

Расчет параметров вспомогательной фазы при пуске рассматривается применительно к типу двигателя.

Однофазный двигатель с пусковой емкостью

Расчет параметров вспомогательной фазы однофазного двигателя с пусковой емкостью при различных условиях пуска производится по формулам табл. 8-1.

Максимальный пусковой момент может быть рассчитан по формуле (8-26), полученной из общего выражения пускового момента подстановкой параметров вспомогательной фазы для условия $M_{к\ макс}$ (табл. 8-1).

При этом величина пускового момента

$$M_{к\ макс} = A\frac{\sqrt{r_{Ак}^2 + x_{Ак}^2} + x_{Ак}}{r'_{Вк}} = A\frac{z_{Ак} + x_{Ак}}{r'_{Вк}}. \quad (8\text{-}32)$$

Пусковой момент при условии получения максимальной добротности или заданного пускового тока рассчитывается по общей формуле (8-26).

Линейный пусковой ток для всех условий пуска (кроме случая, когда пусковой ток задан) рассчитывается по формуле (8-27).

Реактивное сопротивление конденсатора для заданных условий пуска определяется по значению реактивного сопротивления вспомогательной фазы $x'_{Вк}$ (табл. 8-1):

$$|x_{Сп}| = |x'_{Вк}| + |x_{Вк}|, \quad (8\text{-}33)$$

где $x_{Вк}$ — реактивное сопротивление вспомогательной фазы без пускового элемента.

Таблица 8·1

Расчет параметров вспомогательной фазы однофазного двигателя с пусковой емкостью

Условие пуска	Активное сопротивление фазы	Реактивное сопротивление фазы
Максимальный пусковой момент $M_{к\ макс}$	—	$x'_{Вкm}=\frac{r_{Вк}}{r_{Ак}}(x_{Ак}-z_{Ак})$
Максимальный пусковой момент $M_{к\ макс}$ при заданном пусковом токе $i_к=\frac{I_к}{I_н}$	$r_{Вкi}=\frac{r_{Ак}}{2(i_к^2-1)}\pm$ $\pm\frac{\sqrt{r_{Ак}^2+2(i_к^2-1)(z_{Ак}^2+z_{Ак}x_{Ак})}}{2(i_к^2-1)}$	$x'_{Вкi}=\frac{r_{Вкi}}{r_{Ак}}(x_{Ак}-z_{Ак})$
Максимальная добротность $\left(\frac{M_к}{I_к}\right)_{макс}$	—	$x'_{Вк}=\frac{x_{Ак}r_{Вк}-z_{Ак}\sqrt{r_{Вк}(r_{Ак}+r_{Вк})}}{r_{Ак}}$

Продолжение табл. 8-1

Условие пуска	Активное сопротивление фазы	Реактивное сопротивление фазы
Максимальная добротность $\left(\frac{M_к}{I_к}\right)_{макс}$ при заданном пусковом токе $i_к = \frac{I_к}{I_н}$	$r_{Bк} = \frac{r_{Aк}}{i_к^2 - 1}$	$x'_{Bк} = \frac{x_{Aк} - z_{Aк}\, i_к}{i_к^2 - 1}$
Заданный пусковой момент $m_к = \frac{M_к}{M_н}$	—	$x'_{Bк} = \frac{-Ar_{Aк} - \sqrt{A^2 r_{Aк}^2 - M_к (M_к r_{Bк}^2 - 2Ar_{Bк} x_{Aк})}}{M_к}$
Заданный пусковой ток $i_к = \frac{I_к}{I_н}$	—	$x_{Bк} = \frac{c_i^2\, x_{Aк}}{i_к^2 - c_i^2} + \frac{\sqrt{(i_к^2 - c_i^2)\,[c_i^2 (r_{Aк} + r_{Bк}) - i_к^2 r_{Bк}] + i_к^2 c_i x_{Aк}^2}}{i_к^2 - c_i^2}$, здесь $c_i = \frac{I_{Aк}}{I_н}$.

Активное сопротивление конденсатора r_C выбирается предварительно и затем уточняется по каталогу.

Емкость пускового конденсатора рассчитывается по формуле

$$C_п = \frac{10^6}{2\pi f x_{Cп}} \ [мкф],$$

где $x_{Cп}$ — реактивное сопротивление конденсатора, *ом*.

Напряжение на конденсаторе определяется по формуле

$$U_C = I_В z_{Cп}, \qquad (8\text{-}34)$$

где $z_{Cп}$ — полное сопротивление конденсатора, *ом*.

Выбор коэффициента трансформации для двигателя с пусковой емкостью — задача неоднозначная, так как от его значения зависят величина емкости, напряжение на конденсаторе, коэффициент заполнения паза и ряд других величин.

Следует иметь в виду, что для однофазного двигателя с пусковой емкостью в случае, если требуется получить максимальный пусковой момент, коэффициент трансформации может быть определен предварительно по формулам (8-15), (8-19) и (8-20), для конденсаторного двигателя — при круговом вращающемся поле в номинальном режиме.

Для получения в двигателе заданного пускового момента, если он, конечно, меньше максимального, следует k несколько повышать по сравнению с k конденсаторного двигателя. Некоторое увеличение коэффициента трансформации выгодно, так как оно приводит к уменьшению необходимой емкости. Следует иметь в виду, что увеличение k ограничивается допустимой величиной коэффициента заполнения паза.

При расчете вспомогательной фазы двигателя с пусковой емкостью из условий получения максимального момента и максимальной добротности при заданной кратности пускового тока коэффициент трансформации определяется величиной требуемого активного сопротивления вспомогательной фазы (см. табл. 8-1).

Окончательный расчет вспомогательной фазы двигателя с пусковой емкостью, удовлетворяющей оптимальным требованиям пуска, может быть получен только путем сравнения ряда вариантов с различными значениями коэффициента трансформации k, реактивного сопротивления конденсатора $x_{Cп}$ ($C_п$), коэффициента заполнения паза, чис-

ла витков вспомогательной обмотки и числа витков и параметров главной обмотки. Связь между всеми указанными величинами не может быть выражена одной аналитической зависимостью.

Можно дать ряд рекомендаций, каким образом влиять на отдельные пусковые показатели.

Если пусковой момент мал, то его можно увеличить:

1) увеличивая емкость;

2) увеличивая сопротивление ротора;

3) увеличивая число витков вспомогательной обмотки, т. е. коэффициент трансформации.

Если велико напряжение на конденсаторе то следует увеличить:

1) емкость;

2) сопротивление вспомогательной обмотки;

3) сопротивление ротора.

Если пусковой ток велик, то необходимо:

1) увеличить сопротивление ротора;

2) увеличить число витков вспомогательной обмотки и уменьшить при этом емкость пускового конденсатора.

Расчет двигателя с пусковым сопротивлением $r_п$

Расчет параметров вспомогательной фазы однофазного двигателя с пусковым сопротивлением при различных условиях пуска производится по формулам табл. 8-2.

Максимальный пусковой момент может быть рассчитан по формуле, полученной из общего выражения вращающего момента (8-26) подстановкой параметров вспомогательной фазы для условия $M_{к\,макс}$ (табл. 8-2):

$$M_{кмакс} = A\frac{\sqrt{r_{Aк}^2 + x_{Aк}^2} - r_{Aк}}{x_{Bк}} = A\frac{z_{Aк} - r_{Aк}}{x_{Bк}}. \qquad (8\text{-}35)$$

Пусковой момент при условии получения максимальной добротности или заданного пускового тока рассчитывается по общей формуле (8-26).

Линейный пусковой ток для всех условий пуска (кроме случая, когда пусковой ток задан) рассчитывается по (8-27).

Таблица 8-2

Расчет параметров вспомогательной фазы однофазного двигателя с пусковым сопротивлением

Условия пуска	Активное сопротивление фазы	Реактивное сопротивление фазы
Максимальный пусковой момент $M_{К\ макс}$	$r'_{Bкm}=\frac{x_{Bк}}{x_{Aк}}(z_{Aк}+r_{Aк})$	—
Максимальный пусковой момент $M_{К макс}$ при заданном токе $i_К=\frac{I_К}{I_Н}$	$r'_{Bкi}=\frac{x_{Bкi}}{x_{Aк}}(z_{Aк}+r_{Aк})$	$x_{Bкi}=\frac{z_{Aк}(z_{Aк}+r_{Aк})\pm\sqrt{z^2_{Aк}(z_{Aк}+r_{Aк})^2+2(i^2_к-1)(z_{Aк}+r_{Aк})z_{Aк}x^2_{Aк}}}{2(i^2_к-1)\times(z_{Aк}+r_{Aк})}$
Максимальная добротность $\left(\frac{M_К}{I_К}\right)_{макс}$	$r'_{Bк}=\frac{r_{Aк}x_{Bк}+z_{Aк}\sqrt{x_{Bк}(x_{Aк}+x_{Bк})}}{x_{Aк}}$	

Условия пуска	Активное сопротивление фазы	Реактивное сопротивление фазы
Максимальная добротность $\left(\frac{M_к}{I_к}\right)_{макс}$ при заданном токе $i_к=\frac{I_к}{I_н}$	$r'_{Bк}=\frac{r_{Aк}+z_{Aк}i_к}{i_к^2-1}$	$x_{Bк}=\frac{x_{Aк}}{i_к^2-1}$
Заданный пусковой момент $m_к=\frac{M_к}{M_н}$	$r'_{Bк}=\frac{Ax_{Aк}\pm\sqrt{A^2x_{Aк}^2-M_к(M_кx_{Bк}^2+2Ax_{Bк}r_{Aк})}}{M_к}$	
Заданный пусковой ток $i_к=\frac{I_к}{I_н}$	$r_{Bкi}=\frac{c_i^2 r_{Aк}}{i_к^2-c_i^2}+$ $+\frac{\sqrt{(i_к^2+c_i^2)\,[c_i^2(x_{Aк}+x_{Bк})^2-i_к^2x_{Bк}^2]+i_к^2c_i^2r_{Aк}^2}}{i_к^2-c_i^2}$ Здесь $c_i=\frac{I_{Aк}}{I_н}$	

Добавочное активное сопротивление вспомогательной фазы равно:

$$r_{п} = r'_{Вк} - r_{Вк}, \qquad (8\text{-}36)$$

где $r_{Вк}$ — активное сопротивление вспомогательной фазы при пуске без пускового элемента.

При проектировании машины с пусковым сопротивлением коэффициент трансформации k выгодно уменьшать, так как максимальный пусковой момент при этом увеличивается. Целесообразно выбирать k меньшим или равным 1. Это дает возможность увеличить кратность максимального пускового момента в пределе до 1,8—2,2. Однако нельзя забывать, что при этом возрастает пусковой ток.

Плотность тока во вспомогательной фазе можно брать выше, чем в главной фазе.

Уменьшая сечение вспомогательной обмотки ($t>k$), можно уменьшить величину добавочного внешнего пускового сопротивления и даже довести ее до нуля. Такие двигатели называются двигателями с повышенным сопротивлением в пусковой фазе. Иногда часть пусковой обмотки выполняется в виде бифиляра. Бифиляр позволяет улучшить заполнение паза и обеспечивает лучший отвод тепла.

Так же как и при расчете вспомогательной фазы двигателя с пусковой емкостью, в данном случае следует выбирать оптимальные пусковые показатели в результате расчета ряда вариантов с различными коэффициентами трансформации, величинами t, числами витков обеих фаз.

8-5. КРУГОВАЯ ДИАГРАММА ПУСКОВОГО ТОКА ОДНОФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПУСКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Основные пусковые показатели: пусковой момент $M_к$ и пусковой ток $I_к$, а также параметры вспомогательной обмотки, включая величину пусковых элементов, могут быть определены с помощью круговой диаграммы пускового тока для однофазных асинхронных двигателей [Л.6 и 36].

Круговая диаграмма позволяет провести качественное исследование пусковой фазы, выявить влияние параметров вспомогательной и главной фаз и коэффициента трансформации на величину пускового момента и пускового тока.

Графическое решение вопроса о выборе вспомогательной фазы хотя и является менее точным, отличается наглядно-

стью и с успехом может быть использовано для выбора оптимальных параметров вспомогательной фазы. Круговая диаграмма позволяет сравнительно легко решить важную задачу проектирования вспомогательной фазы, обеспечивающей максимальное отношение пускового момента к пусковому току $\left(\frac{M_к}{I_к}\right)_{макс}$ (максимальную добротность).

Круговые диаграммы пускового тока рассматриваются отдельно для однофазного двигателя с пусковой емкостью и с пусковым сопротивлением.

Однофазный двигатель с пусковой емкостью

Круговая диаграмма однофазного двигателя с пусковой емкостью приведена на рис. 8-6.

Диаграмма строится в масштабе тока. Вектор напряжения направляется по оси ординат. Диаметр круговой диаграммы равен отрезку $\overline{AB}$, отложенному на линии AM, параллельной оси ординат. Диаметр представляет собой максимальный ток вспомогательной обмотки при пуске, соответствующей условию, когда индуктивное сопротивление вспомогательной фазы и реактивное сопротивление пускового конденсатора равны: $|x_{Вк}| = |x_С|$. В этом случае полное сопротивление вспомогательной фазы равно ее активному сопротивлению:

$$D_{окр} = \overline{AB} = I_{Вк\,макс} = \frac{U_н}{r_{Вк}}. \tag{8-37}$$

При выбранном значении коэффициента трансформации и сечении вспомогательной обмотки активное сопротивление этой фазы $r_{Вк}$ может быть определено по формулам (8-28) и (8-30).

При изменении реактивного сопротивления вспомогательной фазы, равного разности $x_{Вк} - x_{Сп}$, конец вектора пускового тока вспомогательной обмотки $\dot{I}_{Вк}$ перемещается по дуге окружности $\overset{\frown}{AB}$. Активное сопротивление вспомогательной фазы практически не меняется, так как активное сопротивление конденсатора можно принять равным нулю: $r_С \approx 0$.

На диаграмме откладывается вектор пускового тока главной фазы $I_{Ак}$ (отрезок $\overline{OA}$), который проводится под

углом $\varphi_{Aк}=\operatorname{arctg}\frac{x_{Aк}}{r_{Aк}}$ к вектору напряжения. Линейный пусковой ток $\dot{I}_к$ представляет собой геометрическую сумму векторов тока главной $\dot{I}_{Aк}$ и вспомогательной $\dot{I}_{Bк}$ фазы. Он равен вектору, проведенному из начала координат (точка O) в любую точку окружности. Например, для

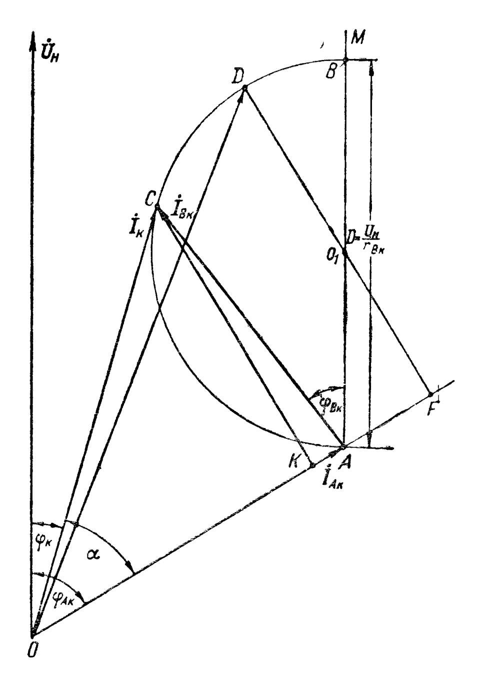


Рис. 8-6. Круговая диаграмма пускового тока для однофазного асинхронного двигателя с пусковой емкостью.

точки C: $\overline{OA}$ — ток главной обмотки, $\overline{AC}$ — ток вспомогательной обмотки, $\overline{OC}$ — линейный пусковой ток.

Мерой начального пускового момента в круговой диаграмме служит высота треугольника пусковых токов OCA (отрезок $\overline{CK}$).

Действительно, так как пусковой момент пропорционален произведению токов в главной и вспомогательной об-

мотках и синусу разности углов сдвига этих токов по отношению к напряжению [Л.6], то

$$M_{к} \equiv I_{Aк} I_{Bк} \sin(\varphi_{Aк} - \varphi_{Bк}) \equiv \overline{CK}. \qquad (8\text{-}38)$$

Максимальный пусковой момент двигателя представляет собой перпендикуляр $\overline{DF}$, опущенный на продолжение вектора тока $I_{Aк}$ и проходящий через центр окружности O_1. Масштаб вращающего момента может быть определен по величине максимального пускового момента, найденного по формуле (8-32).

Отношение пускового момента к пусковому току $\frac{M_{к}}{I_{к}}$ определяется по круговой диаграмме отношением отрезков $\frac{\overline{CK}}{\overline{OC}} = \sin\alpha$. Это отношение будет максимальным при $\sin\alpha =$ = макс, т. е. когда $\overline{OC}$ будет касательной к окружности. Таким образом, максимальная добротность соответствует точке C круговой диаграммы (рис. 8-6).

По данным круговой диаграммы может быть найдено реактивное сопротивлениие вспомогательной фазы, включая сопротивление пускового конденсатора, соответствующее одному из условий пуска: $M_{к\,макс}$; $\left(\frac{M_{к}}{I_{к}}\right)_{макс}$ и заданным $M_{к}$ или $I_{к}$.

$$x'_{Bк} = \sqrt{z'^{2}_{Bк} - r^{2}_{Bк}},$$

где $r_{Bк}$ — активное сопротивление вспомогательной фазы;

$z'_{Bк} = \frac{U_{н}}{I_{Bк}}$;

$I_{Bк}$ — пусковой ток вспомогательной фазы по круговой диаграмме для заданного условия пуска.

Реактивное сопротивление пускового конденсатора

$$|x_{Сп}| = |x'_{Bк}| + |x_{Bк}|, \qquad (8\text{-}39)$$

где $x_{Bк}$ — реактивное сопротивление вспомогательной фазы.

Расчет оптимальной вспомогательной фазы у однофазного двигателя с пусковой емкостью весьма сложен, так как при этом следует выявить взаимное влияние большого числа факторов: емкости пускового конденсатора, напряжения на конденсаторе, коэффициента трансформации,

коэффициента заполнения паза при заданных условиях пуска. Кроме того, следует учесть взаимное влияние параметров главной и вспомогательной обмоток и подобрать оптимальное число витков главной фазы с точки зрения пусковых показателей.

В § 8-4 даются рекомендации по проектированию вспомогательной фазы с пусковой емкостью. Задача проектирования оптимальной вспомогательной фазы может быть решена построением семейства круговых диаграмм для разных чисел витков главной фазы и различных коэффициентов трансформации. При этом можно выявить влияние указанных факторов на величину пусковой емкости и напряжение на конденсаторе при заданных пусковых условиях и допустимом коэффициенте заполнения.

Однофазный двигатель с пусковым сопротивлением

Круговая диаграмма для однофазного двигателя с пусковым сопротивлением представлена на рис. 8-7.

Диаграмма строится в масштабе тока. За направление вектора напряжения принимается ось ординат. Диаметр круговой диаграммы равен отрезку $\overline{AB}$, отложенному по горизонтали. Он представляет собой максимальный ток вспомогательной обмотки при пуске, соответствующий усло-

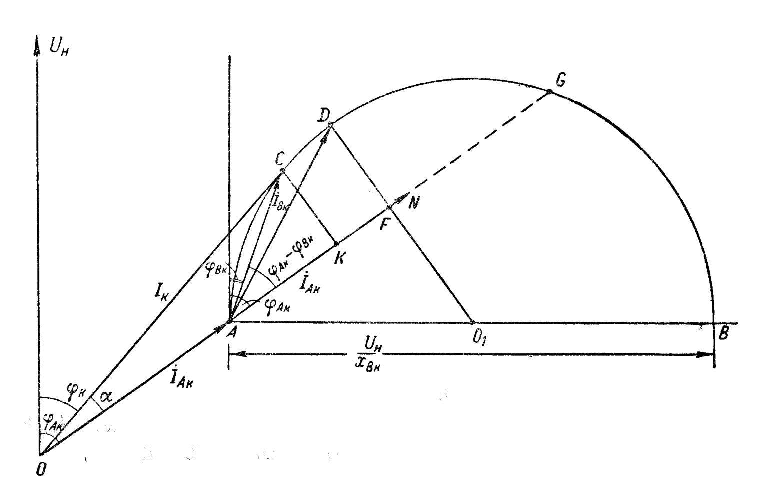


Рис. 8-7. Круговая диаграмма пускового тока для однофазного двигателя с пусковым сопротивлением.

вию, когда активное сопротивление вспомогательной фазы равно нулю. В этом случае полное сопротивление вспомогательной фазы равно ее реактивному сопротивлению $x_{Bк}$:

$$D_{окр} = \overline{AB} = I_{Bк\ макс} = \frac{U_н}{x_{Bк}}. \qquad (8\text{-}40)$$

При выбранном коэффициенте трансформации сопротивление $x_{Bк}$ может быть определено по формулам (8-29) и (8-31).

При изменении активного сопротивления вспомогательной фазы $r'_{Bк}$ от нуля до бесконечности конец вектора пускового тока вспомогательной фазы перемещается по дуге окружности $\overset{\frown}{AB}$. Реактивное сопротивление вспомогательной фазы $x_{Bк}$ постоянно.

На диаграмме откладывается вектор пускового тока главной фазы $\dot{I}_{Aк}$ (отрезок $\overline{OA} = \overline{AN}$) под углом $\varphi_{Aк} = \operatorname{arctg} \frac{x_{Aк}}{r_{Aк}}$ к вектору напряжения.

Линейный пусковой ток $\dot{I}_к$ представляет собой геометрическую сумму токов главной $\dot{I}_{Aк}$ и вспомогательной $\dot{I}_{Bк}$ фазы.

Для точки C на круговой диаграмме: $\overline{OA}$ — ток главной фазы, $\overline{AC}$ — ток вспомогательной фазы, $\overline{OC}$ — линейный пусковой ток.

Мерой начального пускового момента, как это было показано в круговой диаграмме однофазного двигателя с пусковой емкостью, служит перпендикуляр, опущенный из конца вектора пускового тока вспомогательной фазы $\dot{I}_{Bк}$ на вектор пускового тока главной фазы $\dot{I}_{Aк}$.

Максимальный пусковой момент представляет собой перпендикуляр $\overline{DF}$, опущенный на вектор тока $\dot{I}_{Aк}$ и проходящий через центр окружности O_1.

Масштаб вращающего момента может быть определен по величине максимального момента, найденной по (8-35).

Максимальная добротность соответствует точке C круговой диаграммы (рис. 8-7), найденной проведением касательной OC к окружности из точки O.

Активное сопротивление вспомогательной фазы при пуске, включая пусковое сопротивление, по данным круго-

вой диаграммы может быть найдено в зависимости от условий пуска: $M_{\text{к макс}}$; $\left(\frac{M_\text{к}}{I_\text{к}}\right)_{\text{макс}}$ и заданных $M_\text{к}$ или $I_\text{к}$.

$$r'_{B\text{к}} = \sqrt{z'^2_{B\text{к}} - x^2_{B\text{к}}}, \qquad (8\text{-}41)$$

где $z'_{B\text{к}} = \frac{U_\text{н}}{I_{B\text{к}}}$;

$I_{B\text{к}}$ — пусковой ток вспомогательной фазы по круговой диаграмме для заданных условий пуска;

$x_{B\text{к}}$ — реактивное сопротивление вспомогательной фазы.

Активное пусковое сопротивление

$$r_\text{п} = r'_{B\text{к}} - r_{B\text{к}}, \qquad (8\text{-}42)$$

где $r_{B\text{к}}$ — активное сопротивление вспомогательной фазы.

Построив ряд круговых диаграмм для различных коэффициентов трансформации (различных $x_{B\text{к}}$), можно выявить влияние коэффициента трансформации на величину пускового момента и пускового тока для различных случаев: максимального пускового момента, минимального пускового тока, максимальной добротности.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КРИВОЙ МОМЕНТА $M = f(s)$

9-1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОМ, КРУГОВОМ И ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОЛЕ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА

Рабочие характеристики I_s, P_s, M, s, η, $\cos\varphi = f(P_R)$ и кривая $M = f(s)$ могут быть получены для однофазных машин из уравнений, выведенных на основе метода симметричных составляющих в применении к двухфазным системам. Связь между напряжениями, токами и параметрами однофазных машин для прямой и обратной последовательностей устанавливается на основании схем замещения однофазной машины (см. рис. 7-1).

В однофазных машинах на статоре имеются две обмотки (главная и вспомогательная), смещенные в пространстве, как правило, на 90 градусов. В общем случае н. с. обеих фаз неодинаковы ($I_A w_A \neq I_B w_B$) и сдвинуты во времени на произвольный угол. В результате совместного действия этих пульсирующих н. с. возникает эллиптическое вращающееся поле. Частными случаями эллиптического поля являются круговое вращающееся и пульсирующее поля.

Опуская выводы уравнений для расчета рабочих характеристик, с которыми можно познакомиться по литературе [Л. 8], приведем в этом параграфе лишь конечные формулы.

В общем случае эллиптического вращающегося поля токи прямой и обратной последовательностей главной фазы могут быть найдены по формулам:

$$\dot{I}_{A1} = \dot{U}_A \frac{Z_{B2} - jkZ_{A2}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} = I'_{A1} + jI''_{A1}; \qquad (9\text{-}1)$$

$$\dot{I}_{A2} = \dot{U}_A \frac{Z_{B1} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} = I'_{A2} + jI''_{A2}, \qquad (9\text{-}2)$$

где $\dot{U}^*_A$ — фазное напряжение;

Z_{A1} и Z_{A2} — полные сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей фазы A, рассчитанные по формулам (7-1) — (7-8);

Z_{B1} и Z_{B2} — полные сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей фазы B.

В формулах (9-1) и (9-2) сопротивления вспомогательной фазы B для двигателей, у которых числа пазов в фазах равны и сечение провода обмотки B отличается от сечения провода обмотки A в k раз, рассчитываются по формулам:

$$Z_{B1} = (k^2 r_{A1} + r_C) + j(k^2 x_{A1} - x_C); \qquad (9\text{-}3)$$

$$Z_{B2} = (k^2 r_{A2} + r_C) + j(k^2 x_{A2} - x_C), \qquad (9\text{-}4)$$

где r_{A1} и x_{A1} — активное и реактивное сопротивления прямой последовательности для фазы A;

r_{A2} и x_{A2} — то же для обратной последовательности;

r_C и x_C — активное и реактивное сопротивления конденсатора.

* Для однофазных двигателей $U_A = U$, где U — напряжение сети.

Этот случай обычно имеет место в конденсаторных двигателях. Для двигателей с разным числом пазов на фазу (однофазных двигателей с пусковыми элементами, а иногда конденсаторных) сопротивления Z_{B1} и Z_{B2} должны быть рассчитаны с учетом соотношения k и t, а также величины a см. § 8-1):

$$Z_{B1}=\left[kta\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 r_{SA}+k^2 r'_{RA1}+r_{\text{п}}\right]+$$

$$+j\left[k^2 a\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 x_{SA}+k^2 x'_{RA1}-x_{\text{C}}\right]; \qquad (9\text{-}5)$$

$$Z_{B2}=\left[kta\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 r_{SA}+k^2 r'_{RA2}+r_{\text{п}}\right]+$$

$$+j\left[k^2 a\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 x_{SA}+k^2 x_{RA2}-x_{\text{C}}\right]. \qquad (9\text{-}6)$$

Расчет рабочих характеристик и кривой момента $M=f(s)$ проводится по формулам табл. 9-1—9-3. Рассматриваются три случая:

а) эллиптическое поле (общий случай);

б) круговое поле (1-й частный случай);

в) пульсирующее поле (2-й частный случай).

Эллиптическое поле имеет место в конденсаторных двигателях во всем диапазоне скольжений от $s=s_0$ до $s=1$, за исключением режима (обычно $s_{\text{н}}$), для которого выбранная емкость обеспечивает круговое поле, и в однофазных двигателях с пусковыми элементами $r_{\text{п}}$ или $C_{\text{п}}$ при включенной вспомогательной обмотке, т. е. при скольжениях от s_m (s_m — скольжение, соответствующее максимальному моменту) до $s=1$.

Круговое поле имеет место у симметричных двигателей (трехфазных и двухфазных), а также в конденсаторном двигателе; обычно в номинальном режиме $s=s_{\text{н}}$, иногда при пуске $s=1$. Схема замещения при круговом поле совпадает со схемой замещения для токов прямой последовательности (см. рис. 7-1,*а*).

Пульсирующее поле имеет место у однофазных двигателей с пусковыми элементами в рабочем режиме, т. е. когда включена только одна главная обмотка, в диапазоне скольжений от $s=s_0$ до $s=s_m$. Схема замещения для главной фазы при пульсирующем поле приведена на рис. 7-2.

У всех типов двигателей расчет характеристик проводится для ряда скольжений от s_0 до $s=1$, включая номинальный режим $s=s_н$ и режим, соответствующий максимальному моменту ($s=s_m$).

Определение скольжения холостого хода s_0 излагается в § 9-2.

Если полезная мощность P_R, рассчитанная для предварительно выбранного номинального скольжения $s_н$, отличается от номинальной ($P_R \neq P_н$), то скольжение $s_н$ пересчитывается (см. § 9-2).

Начальный пусковой момент и пусковой ток однофазных двигателей при $s=1$ рассчитываются по формулам, приведенным в гл. 8 при проектировании вспомогательной фазы.

В табл. 9-1 даны формулы для расчета токов в обмотках статора и ротора. Токи в главной и вспомогательной фазах вначале рассчитываются без учета потерь в стали, а затем к активной составляющей тока фазы добавляется ток I'_{Ac} от потерь в стали (см. § 6-2). Такой метод значительно упрощает и облегчает расчет машины. После расчета тока в фазах статора с учетом потерь в стали проверяется плотность тока в фазах A и B: $\Delta_A = \frac{I_{SA}}{s_{SA}}$; $\Delta_B = \frac{I_{SB}}{s_{SB}}$.

Рассмотрим вывод формулы для действительного тока ротора прямой последовательности.

Ток прямой последовательности ротора, приведенный к главной фазе, равен:

$$\dot{I}_{RA1} = \frac{\dot{E}_{A1}}{Z_{RA1}},$$

а э. д. с. прямой последовательности

$$\dot{E}_{A1} = \dot{I}_{A1} Z'_{RA1},$$

где Z'_{RA1} — сопротивление разветвления прямой последовательности;

Z_{RA1} — сопротивление ротора прямой последовательности.

Действительный ток ротора прямой последовательности может быть выражен через приведенный ток ротора и ток статора той же последовательности:

$$I''_{RA1} = I_{RA1} \frac{m w_S k_{0S}}{m_R w_R k_{0R}} = I_{RA1} \frac{2 m w_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} = I_{A1} \frac{2 m w_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \cdot \frac{z'_{RA1}}{z_{RA1}},$$

где m — число фаз статора ($m=2$ у однофазного и двухфазного двигателей, $m=3$ у трехфазного двигателя);

$m_R = Z_R$ — число фаз ротора;

$w_R = \frac{1}{2}$ — число витков фазы ротора;

$k_{0R} = k_{\text{ск}}$ — обмоточный коэффициент ротора, рассчитываемый по формуле (2-10) и равный 1, если нет скоса пазов;

w_S — число последовательно соединенных витков в фазе статора;

k_{0S} — обмоточный коэффициент;

z'_{RA1} и z_{RA1} — модули полного сопротивления разветвления и сопротивления ротора для прямой последовательности;

I_{A1} — ток прямой последовательности фазы A.

Аналогично выводится формула для действительного тока ротора обратной последовательности I''_{RA2}.

Полный действительный ток ротора определяется, исходя из теплового действия токов прямой и обратной последовательностей, как

$$I''_{RA} = \sqrt{(I''_{RA1})^2 + (I''_{RA2})^2} = \frac{2mw_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \sqrt{I^2_{RA1} + I^2_{RA2}} =$$

$$= \frac{2mw_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \sqrt{\left(I_{A1} \frac{z'_{RA1}}{z_{RA1}}\right)^2 + \left(I_{A2} \frac{z'_{RA2}}{z_{RA2}}\right)^2},$$

где I_{RA2} и I_{A2} — приведенный ток в роторе и ток в статоре обратной последовательности для фазы A.

Действительные токи в роторе для кругового и пульсирующего полей получаются как частные случаи.

По значению действительного тока ротора определяется плотность тока в стержнях:

$$\Delta_{\text{ст}} = \frac{I''_{RA}}{s_{\text{ст}}},$$

где $s_{\text{ст}}$ — сечение стержня.

В табл. 9-2 сведены формулы для расчета мощностей и вращающего момента.

Расчет токов в обмотках

Наименование величины	Эллиптическое поле (общий случай)
Ток главной фазы без учета потерь в стали	$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = I'_A + jI''_A = I_A e^{j\varphi_A}$ (9-7) $\dot{I}_{A1}$ и $\dot{I}_{A2}$ по (9-1,2)
Ток главной фазы с учетом потерь в стали	$\dot{I}_{SA} = (\dot{I}'_A + I'_{Ac}) + jI''_A =$ I'_{Ac} по (6-14, 16)
Ток вспомогательной фазы без учета потерь в стали	$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = I'_B + jI''_B =$ $= j\frac{\dot{I}_{A1}}{k} - j\frac{\dot{I}_{A2}}{k} = I_B e^{j\varphi_B}$ (9-11)
Ток вспомогательной фазы с учетом потерь в стали	$\dot{I}'_{SB} = (I'_B + I'_{Bc}) + jI''_B =$ $= \dot{I}'_{SB} + j\dot{I}''_{SB} = I_{SB} e^{j\varphi_B}$ (9-13)
Ток сети	$\dot{I}_S = \dot{I}_{SA} + \dot{I}_{SB} = \dot{I}'_S + \dot{I}''_S =$ $= I_S e^{j\varphi}$ (9-15)
Действительный ток ротора прямой последовательности	$I''_{RA1} = I_{A1}\frac{2mw_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \times$ $\times \frac{z'_{RA1}}{z_{RA1}}$ (9-17) $z_{RA1} = \sqrt{\left(\frac{r_{RA}}{s}\right)^2 + x^2_{RA}}$; z'_{RA1} по (7-2)

Таблица 9-1

статора и ротора

Круговое поле (1-й частный случай)	Пульсирующее поле (2-й частный случай)
$\dot I_A = \frac{\dot U_A}{Z_{A1}} = \frac{\dot U_A}{\sqrt{r_{A1}^2 + x_{A1}^2}} =$ $= I'_A + jI''_A = I_A e^{j\varphi_A}$ (9-8) Z_A по (7-1) — (7-6)	$\dot I_{A1} = \dot I_{A2} = \frac{1}{2}\dot I_A;$ (9-9) $\dot I_A = 2\dot I_{A1} = \frac{\dot U_A}{Z_{A1}+Z_{A2}} =$ $= I'_A + jI''_A = I_A e^{j\varphi_A}.$ Z_{A1} и Z_{A2} по (7-1) — (7-8)

$$= I'_{SA} + jI''_A = I_{SA} e^{j\varphi_A}$$

I'_{Ac} по (6-13)	I'_{Ac} по (6-18, 19)
$\dot I_B = j\frac{\dot I_A}{k} = I_B e^{j\varphi_B}$ (9-12)	—
$\dot I_{SB} = j\frac{\dot I_{SA}}{k} = I_{SB} e^{j\varphi_B}$ (9-14)	—
$\dot I_S = \dot I_{SA} + \dot I_{SB} =$ $= \dot I_{SA}\left(1 + j\frac{1}{k}\right) =$ $= I'_S + jI''_S = I_S e^{j\varphi}$ (9-16)	$\dot I_S = \dot I_{SA} = I_{SA} e^{j\varphi_A}$
—	$I''_{RA_1} = I_A \frac{2w_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \times$ $\times \frac{z'_{RA1}}{z_{RA1}}$ (9-18) z'_{RA1} по (7-2)

Наименование величины	Эллиптическое поле (общий случай)
Действительный ток ротора обратной последовательности	$I''_{RA2} = I_{A2}\frac{2mw_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}}\ \frac{z'_{RA2}}{z_{RA2}}$ (9-19) $z_{RA2} = \sqrt{\left(\frac{r_{RA}}{2-s}\right)^2 + x_{RA}^2}$; z'_{RA2} по (7-8)
Действительный ток ротора	$I''_{RA} = \frac{2mw_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \times$ $\times \sqrt{\left(I_{A1}\frac{z'_{RA1}}{z_{RA1}}\right)^2 + \left(I_{A2}\frac{z'_{RA2}}{z_{RA2}}\right)^2}$ (9-21)

Соотношение между отдельными мощностями в самом общем случае у однофазного двигателя при эллиптическом поле иллюстрирует энергетическая диаграмма (рис. 9-1).

В диаграмме мощность, подводимая из сети, P_S частично теряется в статоре на электрические потери P_{MS}, потери в стали* $P_с$ и в пусковом элементе $P_к$ ($P_п$).

Оставшаяся мощность передается в виде электромагнитной мощности прямой и обратной последовательностей $P_{э1}$ и $P_{э2}$ от статора к ротору. Что касается мощности обратной последовательности $P_{э2}$, то она идет на покрытие потерь в меди ротора P_{MR2} от токов обратной последовательности. Потери в меди ротора P_{MR2} покрываются неполностью; оставшаяся часть потерь покрывается за счет электромагнитной мощности прямой последовательности $P_{э1}$ (рис. 9-1). Таким

* Условно считают, что все потери в стали (статора и ротора) покрываются за счет мощности, подводимой из сети.

Круговое поле (1-й частный случай)	Пульсирующее поле (2-й частный случай)
—	$I''_{RA2} = I_A \dfrac{2w_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \dfrac{z_{RA2}}{z_{RA2}}$ (9-20) z_{RA2} по (7-8)
$I''_R = \dfrac{2mw_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} I_A \dfrac{z'_{RA}}{z_{RA}}$ (9-22) $z_{RA} = \sqrt{\left(\dfrac{r_{RA}}{s}\right)^2 + x^2_{RA}}$	$I_R = \dfrac{2w_S k_{0S}}{Z_R k_{0R}} \times$ $\times I_A \sqrt{\left(\dfrac{z'_{RA1}}{z_{RA1}}\right)^2 + \left(\dfrac{z'_{RA2}}{z_{RA2}}\right)^2}$ (9-23)

образом, при эллиптическом поле электромагнитный момент и мощность на валу машины уменьшаются за счет обратного поля.

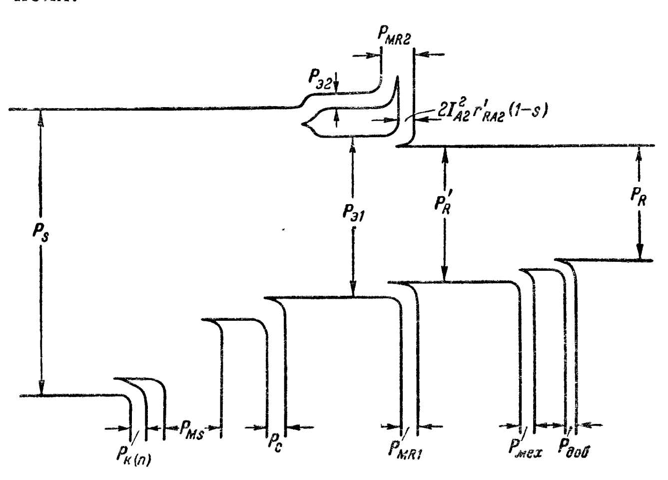


Рис. 9-1. Энергетическая диаграмма однофазного асинхронного микродвигателя.

Таблица 9-2

Расчет мощностей и вращающего момента

Наименование величины	Эллиптическое поле (общий случай)	Круговое поле (1-й частный случай)	Пульсирующее поле (2-й частный случай)
Электромагнитная мощность, *вт*	$P_э = P_{э1} - P_{э2} = 2I_{A1}^2 r'_{RA1} - 2I_{A2}^2 r'_{RA2}$ (9-24) r'_{RA1} и r'_{RA2} по (7-3)	$P_э = mI_A^2 r'_{RA}$ (9-25) r'_{RA} по (7-3)	$P_э = P_{э1} - P_{э2} = \frac{1}{2} I_A^2 (r'_{RA1} - r'_{RA2})$ (9-26) r'_{RA1} и r'_{RA2} по (7-3)
Электромагнитный момент, $Г \cdot см$	$M_э = \frac{97,4 \cdot 10^3}{n_c} P_э$ (9-27)		
Полная механическая мощность, *вт*	$P'_R = P_э (1 - s)$ (9-28)		
Полезная механическая мощность, *вт*	$P_R = P'_R - P_{мех} - P_д$ (9-29) $P_{мех}$ по (6-20), (6-21), (6-22); $P_д$ по (6-32)		

Продолжение табл. 9-2

Наименование величины	Эллиптическое поле (общий случай)	Круговое поле (1-й частный случай)	Пульсирующее поле (2-й частный случай)
Полезный момент, *Г·см*	$M = \frac{97,4 \cdot 10^3 P_R}{n_с(1-s)}$ (9-30)		
Сумма потерь, *вт*	$\Sigma P = P_{MS} + P_{MR} + P_с + P_к(P_п) + P_{мех} + P_д$ (9-31)		$\Sigma P = P_{MS} + P_{MR} + P_с + P_{мех} + P_д$ (9-32)
	P_{MR} по (6-27)	P_{MR} по (6-28)	P_{MR} по (6-29)
Подводимая мощность, *вт*	$P_S = P'_R + P_{MS} + P_{MR} + P_с + P_к(P_п)$ (9-33) $P_к(P_п)$ по (6-30) и (6-31)		$P_S = P'_R + P_{MS} + P_{MR} + P_с$ (9-34) P_{MS} по (6-25); $P_с$ по (6-9)—(6-12) P_{MR} по (6-29)
	P_{MS} по (6-23); P_{MR} по (6-27) $P_с$ по (6-9)—(6-12)	P_{MS} по (6-24); P_{MR} по (6-28) $P_с$ по (6-9)—(6-11)	

Таблица 9-3

Расчет к. п. д., коэффициента мощности и напряжения на фазосдвигающем элементе

Наименование величины	Эллиптическое поле (общий случай)	Круговое поле (1-й частный случай)	Пульсирующее поле (2-й частный случай)
Коэффициент полезного действия	$\eta = \frac{P_R}{P_S}$ (9-35), если $\eta < 0{,}5$ или $\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_S}$ (9-36)		
Коэффициент мощности главной фазы	$\cos\varphi_A = \frac{I'_{SA}}{I_{SA}}$ (9-37)		
Коэффициент мощности вспомогательной фазы	$\cos\varphi_B = \frac{I'_{SB}}{I_{SB}}$ (9-38)		—
Общий коэффициент мощности	$\cos\varphi = \frac{I'_S}{I_S}$ (9-39)		$\cos\varphi = \cos\varphi_A$
Напряжение на вспомогательной обмотке	$\dot{U}_B = \dot{I}_{SB1} Z_{B1} + \dot{I}_{SB2} Z_{B2}$; (9-40)	$\dot{U}_B = \dot{I}_{SB} Z_B$ (9-41)	—
Напряжение на фазосдвигающем элементе	Для конденсаторного двигателя $\dot{U}_C = \dot{I}_{SB} Z_C$ (9-42)		
	—	$\dot{U}_C = \dot{U}_A \sqrt{1 + k^2}$ (9-43)	

Для трехфазного двигателя следует пользоваться расчетными формулами для кругового поля за исключением формул (9-12)—(9-16), связанных с расчетом фазы B.

Полная механическая мощность P'_R на валу равна результирующей электромагнитной мощности, за вычетом потерь в меди ротора от тока прямой последовательности P_{MR1}. Если из полной мощности вычесть потери механические $P_{мех}$ и добавочные $P_д$, то можно определить полезную мощность на валу ротора P_R. Коэффициент полезного действия двигателя при эллиптическом поле уменьшается по сравнению с двигателем, работающим при круговом поле, как за счет уменьшения полезной мощности, так и за счет увеличения подводимой мощности.

В табл. 9-3 приведены формулы для расчета к. п. д., коэффициентов мощности фаз и сети, а также напряжения на фазосдвигающем элементе.

9-2. РАСЧЕТ СКОЛЬЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА И УТОЧНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НОМИНАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Для расчета режима реального холостого хода необходимо прежде всего определить скольжение в этом режиме s_0.

Получение аналитической зависимости для s_0 весьма затруднено, особенно у однофазных машин. Для этой цели может быть рекомендован графический метод, основанный на том, что электромагнитная мощность в режиме холостого хода

$$P'_{э0} = P'_{э0} s_0 + P_{мех} + P_{доб}$$

или

$$P'_{э0} = \frac{P_{мех} + P_{доб}}{1 - s_0}. \qquad (9\text{-}44)$$

Так как в области малых скольжений $P_э = f(s)$ линейна, то, продолжая эту прямую до значения $P_э$ при $s = 0$, найдем точку пересечения ее с кривой $\frac{P_{мех} + P_{доб}}{1 - s} = f(s)$, нанесенной на том же графике (рис. 9-2).

При скольжении $s = 0$, т. е. при синхронном холостом ходе, электромагнитная мощность имеет отрицательный знак и численно равна мощности обратной последовательности:

$$P_{э0} = P_{э2} = -\frac{1}{2} I_{SA}^2 r'_{RA2}. \qquad (9\text{-}45)$$

Параметры схемы замещения фазы A при $s=0$ можно определить путем раскрытия неопределенности в уравнениях (7-3) и (7-4).

Активное сопротивление разветвления прямой последовательности для этого режима $r'_{RA1}=0$; индуктивное сопротивление разветвления прямой последовательности

$$x'_{RA1}=x_{mA}\,. \tag{9-46}$$

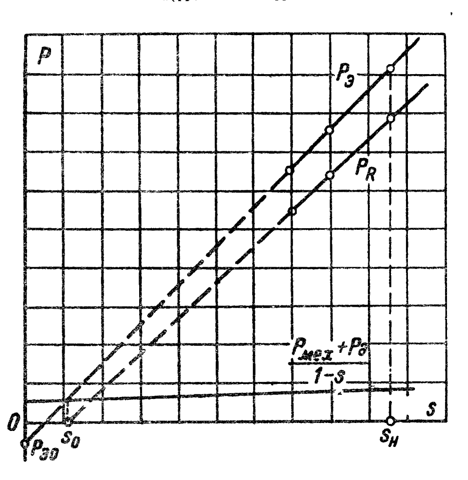


Рис. 9-2. К расчету скольжения холостого хода s_0 и уточнению $s_н$.

Активное сопротивление разветвления обратной последовательности

$$r'_{RA2}=\frac{x_{mA}^2\frac{r_{RA}}{2}}{\left(\frac{r_{RA}}{2}\right)^2+(x_{mA}+x_{RA})^2}\,. \tag{9-47}$$

Индуктивное сопротивление разветвления обратной последовательности

$$x'_{RA2}=\frac{x_{mA}\frac{r_{RA}}{2}+x_{mA}x_{RA}(x_{mA}+x_{RA})}{\left(\frac{r_{RA}}{2}\right)^2+(x_{mA}+x_{RA})^2}\,. \tag{9-48}$$

В формуле (9-45) ток I_{SA} у однофазных двигателей с пусковыми элементами может быть найден по (9-9) или (9-10), а у конденсаторных двигателей — по (9-7) или (9-10).

Для найденного графическим путем скольжения s_0 определяют токи и потребляемую мощность холостого хода в зависимости от типа двигателя в соответствии с характером поля.

Полученное значение скольжения реального холостого хода s_0 может быть также использовано для уточнения величины номинального скольжения. Выбранная предварительно величина номинального скольжения $s_н$ не всегда соответствует заданному значению номинальной мощности $P_н$.

Так как зависимость полезной мощности $P_R = f(s)$ (рис. 9-2) в диапазоне скольжений от s_0 до $s_н$ линейна, то истинное номинальное скольжение может быть найдено по формуле

$$s'_н = \frac{P_н}{P'_н}(s_н - s_0) + s_0, \qquad (9\text{-}49)$$

где $P'_н$ — полезная мощность, соответствующая предварительно выбранному номинальному скольжению $s_н$.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ОДНОФАЗНЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

10-1. ОБЩИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Как известно, трехфазный асинхронный двигатель может быть использован без какого-либо изменения его конструкции и обмоточных данных для работы от однофазной сети в качестве:

1) однофазного конденсаторного с постоянно включенной емкостью;

2) однофазного с пусковой емкостью;

3) однофазного с пусковым сопротивлением.

Наиболее распространенные схемы включения таких двигателей приведены на рис. В-1.

В указанных схемах включения трехфазного двигателя две фазы соединяются последовательно (конец с концом) и образуют рабочую обмотку A, а третья фаза служит вспомогательной обмоткой B.

Можно специально спроектировать асинхронный микродвигатель, который будет работать как трехфазным, так

и однофазным во всех перечисленных схемах включения. Такой двигатель называется универсальным [Л. 12]. Его универсальность оправдывается лишь в том случае, когда при соответствующем выборе параметров схемы замещения и величины добавочных элементов получают достаточно хорошие рабочие и пусковые характеристики всех перечисленных производных машин.

В универсальном двигателе необходимо выполнить обмотку двухслойной с укорочением на 1/3 шага с тем, чтобы

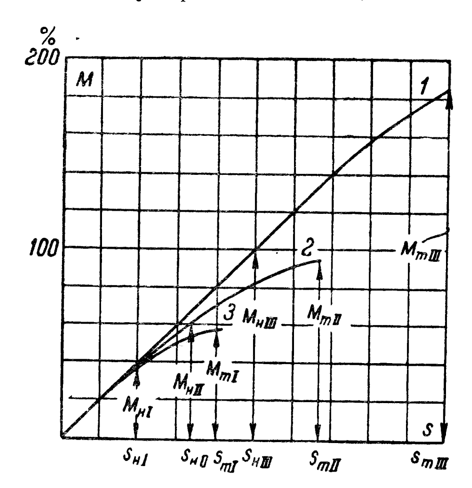


Рис. 10-1. Зависимость вращающего момента от скольжения (от $s \approx 0$ до s_m) трехфазного асинхронного двигателя при различных схемах включения.

1 — трехфазной; 2 — конденсаторной; 3 — однофазной с пусковыми элементами ($r_п$ или $C_п$).

избежать провалов в кривой момента от третьей гармоники поля, которая может резко проявляться в однофазных двигателях. Это явление особенно заметно при малых значениях пускового момента и больших пусковых токах, т. е. в схемах с пусковым сопротивлением.

Известно, что если принять полезную мощность трехфазного двигателя $P_{нIII}$ за 100%, то в этом же типоразмере можно спроектировать конденсаторный двигатель с постоянно включенной рабочей емкостью полезной мощностью, составляющей в среднем 65 — 70%, а однофазный с отключаемой пусковой обмоткой мощностью, равной 35—45% от $P_{нIII}$.

При этом может быть обеспечена удовлетворительная перегрузочная способность двигателя.

Учитывая это обстоятельство, а также линейную зависимость $M = f(s)$ в рабочей зоне (от $s = s_0$ до $s = s_m$), можно принять следующие соотношения для номинальных моментов и скольжений двигателя при различных однофазных схемах включения:

1. Для конденсаторного двигателя с постоянно включенной емкостью

$$M_{\text{нII}} = (0{,}65 - 0{,}70)\, M_{\text{нIII}}\,.$$

2. Для однофазного двигателя с отключаемой пусковой обмоткой

$$M_{\text{нI}} = (0{,}35 - 0{,}45)\, M_{\text{нIII}}\,.$$

Здесь индексы III, II, I относятся соответственно к трехфазному, конденсаторному и однофазному двигателям. На рис. 10-1 приведены примерные зависимости $M = f(s)$ для трех схем включения двигателя: трехфазной, конденсаторной и однофазной с $C_{\text{п}}$ или однофазной с $r_{\text{п}}$ (в зоне скольжений от $s = 0$ до $s = s_m$).

10-2. ПАРАМЕТРЫ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ МАШИНЫ, ПРОИЗВОДНОЙ ОТ ТРЕХФАЗНОЙ

Исходными данными для выбора добавочных элементов являются расчетные или опытные параметры схемы замещения трехфазной машины:

r_S и x_S — активное и индуктивное сопротивления одной фазы статорной обмотки;

r_R и x_R — активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора, приведенные к числу фаз и витков статора;

x_m — индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре.

Принятая схема однофазного включения трехфазного двигателя может быть исследована методом симметричных составляющих для двухфазных машин.

У двухфазной машины, полученной из трехфазной, коэффициент трансформации — величина однозначная:

$$k = \frac{w_{эB}}{w_{эA}} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,, \tag{10-1}$$

где $w_{эB}$ и $w_{эA}$ — эффективные числа витков обмоток A и B производной двухфазной машины.

Коэффициент приведения сопротивлений ротора к числу фаз двухфазной машины ($m=2$) и числу витков рабочей обмотки A равен:

$$k_{12}^2 = \frac{m_{II}\, w_{эA}^2}{m_{III} w_{эB}^2} = \frac{2w_{эA}^2}{3w_{эB}^2} = 2, \qquad (10\text{-}2)$$

где m_{II} и m_{III} — числа фаз соответственно двухфазной и трехфазной машин.

Параметры схемы замещения для фазы A:

$r_{SA} = 2r_S$ — активное сопротивление фазы A;

$x_{SA} = 2x_S$ — индуктивное сопротивление фазы A;

$r_{RA} = k_{12}^2 r_R = 2r_R$ — активное сопротивление ротора, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы A);

$x_{RA} = 2x_R$ — индуктивное сопротивление ротора, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы A);

$x_{mA} = \frac{1}{k^2} x_m = 3x_m$ — индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы A).

Параметры схемы замещения для фазы B:

$r_{SB} = r_S$ и $x_{SB} = x_S$ — активное и индуктивное сопротивления фазы B;

$r_{RB} = k^2 r_{RA} = \frac{1}{3} r_{RA} = \frac{2}{3} r_R$ — активное сопротивление ротора фазы B;

$x_{RB} = k^2 x_{RA} = \frac{1}{3} x_{RA} = \frac{2}{3} x_R$ — индуктивное сопротивление ротора фазы B;

$x_{mB} = k^2 x_{mA} = \frac{1}{3} x_{mA} = x_m$ — индуктивное сопротивление фазы B, соответствующее потоку в воздушном зазоре.

Таким образом, схемы замещения трехфазного двигателя, работающего в однофазном режиме, примут вид, изображенный на рис. 10-2.

Сопротивления разветвления прямой последовательности для каждой из фаз, так же как и у однофазных двигателей, определяются по формулам (7-3) и (7-4). Активное r'_{RA2} и индуктивное x'_{RA2} сопротивления разветвления обратной по-

следовательности рассчитываются по формулам (7-3) и (7 4) с подстановкой вместо s скольжения $2-s$, причем

$$r'_{RB1}=\frac{1}{3}r'_{RA1};\quad r'_{RB2}=\frac{1}{3}r'_{RA2};$$

$$x'_{RB1}=\frac{1}{3}x'_{RA1};\quad x'_{RB2}=\frac{1}{3}x'_{RA2}.$$

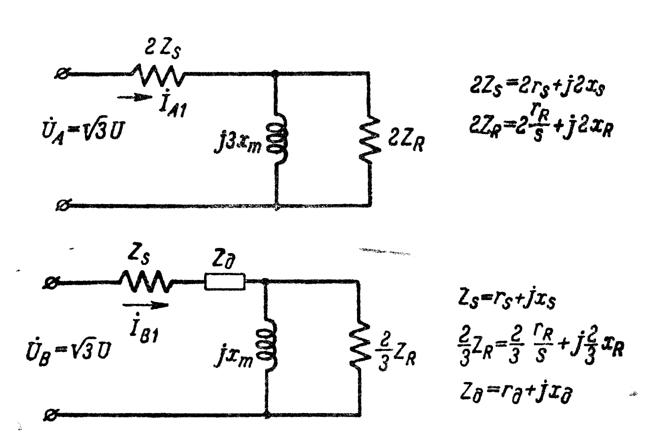


Рис. 10-2. Схема замещения для токов прямой последовательности фаз A и B однофазного двигателя, производного от трехфазного.

Полные сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей фаз A и B в двухфазной машине, производной от трехфазной, равны:

$$Z_{A1}=r_{A1}+jx_{A1}=(2r_S+r'_{RA1})+j(2x_S+x'_{RA1});\qquad(10\text{-}3)$$

$$Z_{A2}=r_{A2}+jx_{A2}=(2r_S+r'_{RA2})+j(2x_S+x'_{RA2});\qquad(10\text{-}4)$$

$$Z'_{B1}=r_{B1}+jx_{B1}=\left(r_S+\frac{1}{3}r'_{RA1}+r_{\text{п}}\right)+$$
$$+j\left(x_S+\frac{1}{3}x'_{RA1}-x_{\text{C}}\right);\qquad(10\text{-}5)$$

$$Z'_{B2}=r_{B2}+jx_{B2}=\left(r_S+\frac{1}{3}r'_{RA2}+r_{\text{п}}\right)+$$
$$+j\left(x_S+\frac{1}{3}x'_{RA2}-x_{\text{C}}\right).\qquad(10\text{-}6)$$

Полные сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей фазы B, рассчитываемые по формулам (10-5) и (10-6), содержат сопротивления вспомогательных (пусковых) элементов. Методика расчета вспомогательных элементов и рабочих характеристик зависит от типа двигателя и рассматривается в последующих параграфах.

10-3. КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Рабочая емкость $C_{\text{р}}$ для конденсаторного двигателя должна быть выбрана по условию получения кругового поля в номинальном режиме, т. е. при скольжении $s_{\text{нII}} = (0{,}65 \div 0{,}70)\, s_{\text{нIII}}$.

Величины емкости и коэффициента трансформации для конденсаторного двигателя при круговом поле могут быть определены по уравнениям (8-17), (8-18) и (8-15).

Однако у конденсаторного двигателя, полученного из трехфазного, коэффициент трансформации — величина однозначная: $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$. Следовательно, получить круговое поле в номинальной точке при $s_{\text{нII}}$ с добавочным элементом в виде одной емкости (без $r_{\text{д}}$) практически невозможно. Вследствие этого можно принять следующий порядок выбора необходимой в конденсаторном двигателе рабочей емкости и расчета рабочих характеристик:

1. Определяются емкостное сопротивление и емкость по уравнениям:

$$|x_{C\text{р}}| = kr_{A1} + k^2 x_{A1} = \frac{1}{\sqrt{3}}(r_{SA} + r'_{RA1}) + \frac{1}{3}(x_{SA} + x'_{RA1}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(2r_S + r'_{RA1}) + \frac{1}{3}(2x_S + x'_{RA1}); \quad (10\text{-}7)$$

$$C_{\text{р}} = \frac{10^6}{2\pi f x_{C\text{р}}}. \quad (10\text{-}8)$$

2. По формулам (10-3) — (10-6) с учетом добавочного емкостного сопротивления в фазе B $x_{C\text{р}}$ находят параметры схем замещения Z_{A1}, Z_{A2}, Z'_{B1} и Z'_{B2} при $s_{\text{нII}} = (0{,}65 \div 0{,}7)\, s_{\text{нIII}}$; $s_{\text{нIII}}$ определяется по паспортным данным трехфазного двигателя.

3. Рассчитываются токи прямой и обратной последовательностей по (9-1) и (9-2) для оценки степени эллиптичности поля.

4. Если эллиптичность поля велика (ток обратной последовательности I_{A2} значителен), то расчет рабочих характеристик M, P_S, I_S, $\cos\varphi$, η, $s=f(P_R)$ следует вести для случая эллиптического поля.

В частности, номинальный момент двигателя в этом случае может быть найден по формулам (9-24) и (9-27), для которых параметры схемы замещения определены при $s_{\text{нII}}=(0{,}65\div0{,}70)\,s_{\text{нIII}}$.

Если полученное значение номинального момента $M_{\text{нII}}$ меньше $(0{,}65-0{,}7)\,M_{\text{нIII}}$, то следует выбрать другую емкость и пересчитать параметры схемы замещения и $M_{\text{нII}}$ для принятого номинального скольжения.

Перегрузочная способность конденсаторного двигателя может быть установлена точно только после расчета всей механической характеристики двигателя.

В том случае, когда выбранная емкость обеспечивает в каком-либо режиме конденсаторного двигателя поле, близкое к круговому, можно рассчитать момент по формуле

$$M_{\text{II}}=\frac{97{,}4}{n_{\text{c}}}2I_A^2r'_{RA}=\frac{97{,}4}{n_{\text{c}}}2(\sqrt{3}U)^2\frac{r'_{RA}}{(r_{SA}+r'_{RA})^2+(x_{SA}+x'_{RA})^2}=$$

$$=\frac{584U^2r'_{RA}}{n_{\text{c}}(r_A^2+x_A^2)},\qquad(10\text{-}9)$$

где

$$I_A=\frac{U_A}{\sqrt{r_A^2+x_A^2}}=\frac{\sqrt{3}U}{\sqrt{r_A^2+x_A^2}},$$

так как $U_A=U_B=U_{\text{л}}=\sqrt{3}U$.

У конденсаторного двигателя, полученного из трехфазного, можно получить круговое поле в номинальном режиме при $s_{\text{нII}}=(0{,}65\div0{,}7)\,s_{\text{нIII}}$ при условии включения во вспомогательную фазу, кроме емкости, добавочного активного сопротивления.

На рис. 8-3 приведена векторная диаграмма конденсаторного двигателя с $C_{\text{р}}$ и $r_{\text{д}}$ при круговом поле. В этом случае

величина добавочного сопротивления определяется из уравнения (8-22) при $r_С \approx 0$:

$$r_д = x_{A1}k - r_{A1}k^2 = \frac{x_{A1}}{\sqrt{3}} - \frac{r_{A1}}{3}, \qquad (10\text{-}10)$$

так как $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

Емкость конденсатора определяется из уравнения (8-17):

$$x_С = k^2 x_{A1} + k r_{A1} = \frac{x_{A1}}{3} + \frac{r_{A1}}{\sqrt{3}}. \qquad (10\text{-}11)$$

Расчет номинального режима при $s_{нII} = (0{,}65 \div 0{,}7)\, s_{нIII}$ следует вести по формулам, соответствующим круговому полю. Пусковой ток и пусковой момент конденсаторного двигателя с постоянно включенной емкостью рассчитываются по формулам (9-15), (9-24) и (9-27) при эллиптическом поле для скольжения $s = 1$.

10-4. ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПУСКОВОЙ ЕМКОСТЬЮ

При однофазной схеме включения трехфазного двигателя с пусковой емкостью (см. рис. В-1,*б*) рабочие свойства двигателя определяются параметрами только одной рабочей фазы, так как двигатель работает при отключенной вспомогательной фазе.

Формулы для расчета рабочих характеристик двигателя в рассматриваемой схеме те же, что и для двигателя, специально спроектированного как однофазный с пусковой емкостью (см. табл. 9-1—9-3 для пульсирующего поля).

При этом следует учесть, что рабочие свойства однофазного двигателя, полученного из трехфазного, можно считать удовлетворительными, если номинальный момент двигателя при $s_{нI} = (0{,}35 \div 0{,}45)\, s_{нIII}$ $M_{нI} \geqslant (0{,}35 \div 0{,}45)\, M_{нIII}$.

Максимальный момент должен быть примерно таким же, как у специально спроектированного однофазного двигателя с пусковой емкостью. Что касается пусковых характеристик, то они зависят от величины добавочного элемента (емкости). Емкость $C_п$ выбирается в зависимости от предъявляемых требований по формулам § 8-4 табл. 8-1.

10-5. ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПУСКОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

В рабочем режиме поле в двигателе пульсирующее, и рабочие характеристики могут быть рассчитаны по форму-

лам, приведенным в табл. 9-1—9-3. Рабочие свойства однофазного двигателя с пусковым сопротивлением, полученного из трехфазного, те же, что у однофазного двигателя с пусковой емкостью.

Пусковые характеристики для данного типа двигателя определяются из условий, оговоренных в § 8-4 (см. табл. 8-2).

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

Особенностью микромашин является большое количество типов, модификаций и конструктивных исполнений, так как на конструкцию машины существенное влияние оказывает привод.

В зависимости от технических требований асинхронные микродвигатели могут быть выполнены в любом из пере-

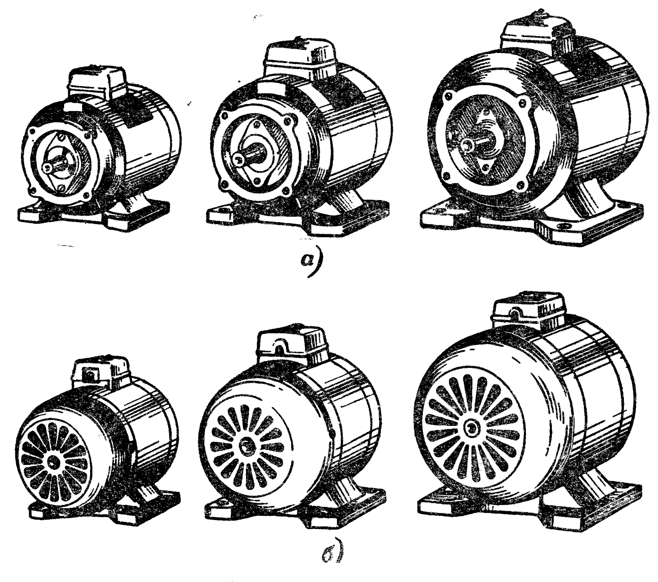


Рис. 11-1. Закрытые обдуваемые двигатели АОЛ и АОЛБ (нулевого, первого и второго габаритов).

а — вид со стороны свободного конца вала; *б* — вид со стороны наружного вентилятора.

а)

б)

Рис. 11-2. Закрытый двигатель типа 877-А для привода медицинских аппаратов.

а — в собранном виде; *б* — в разобранном виде.

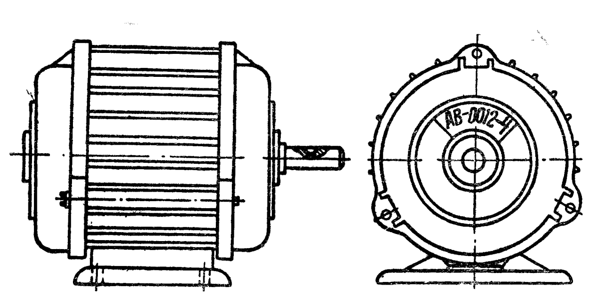


Рис. 11-3. Закрытый двигатель типа АВ-0012-4.

численных ниже исполнений: 1) закрытом (рис. 11-1—11-3); 2) защищенном (рис. 11-4); 3) открытом (рис. 11-5); 4) встроенном (рис. 11-6).

Открытое исполнение по условиям эксплуатации двигателей общего применения применяется реже других.

Важное значение приобретает встроенное исполнение, при котором конструкция машины тесно увязана с конструкцией привода.

Конструкция двигателей связана также с принятой системой вентиляции. В микродвигателях применяется: 1) естественное охлаждение (без вентилятора); 2) самовентиляция с вентилятором внутри машины (рис. 11-7); 3) наружная вентиляция — обдув (рис. 11-8).

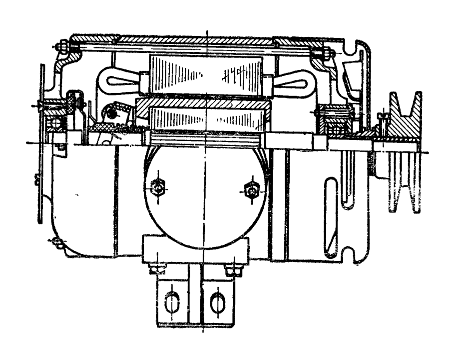


Рис. 11-4. Защищенный двигатель типа ДСМ.

Внешний обдув может осуществляться и от постороннего устройства. Различают системы вентиляции радиальную и аксиальную в зависимости от направления потока воздуха, обусловленного конструкцией машины. Кроме того, в зависимости от характера работы вентилятора различают вентиляцию нагнетательную и вытяжную. При нагнетательной вентиляции холодный воздух попадает на вентилятор и нагревается за счет потерь в нем; при вытяжной вентиляции в машину попадает холодный воздух. В двигателях закрытого исполнения применяются естественное охлаждение и внешний обдув. В защищенном, открытом и встроенном исполнениях применяются естественное охлаждение или самовентиляция.

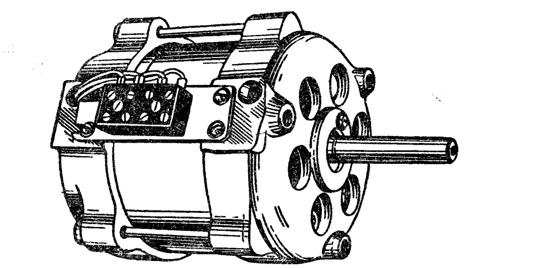


Рис. 11-5. Открытый двигатель типа ДВА-У1.

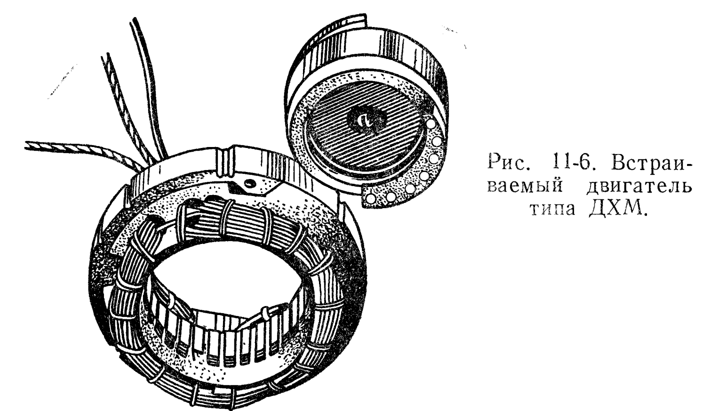


Рис. 11-6. Встраиваемый двигатель типа ДХМ.

Рис. 11-7. Самовентиляция.

а — аксиальная вытяжная; *б* — радиальная нагнетательная.

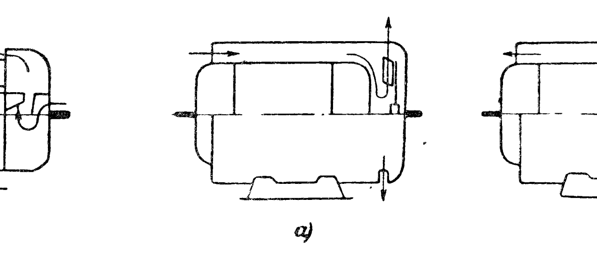


Рис. 11-8. Наружная самовентиляция с обдувом под рубашкой.

а — вытяжная; *б* — нагнетательная.

Иногда во встроенных двигателях используется внешний обдув от постороннего источника.

При выборе того или иного исполнения асинхронных микродвигателей следует руководствоваться следующими соображениями:

1) условиями работы проектируемого двигателя в заданном типе привода, т. е. выяснить, есть ли необходимость в закрытом или защищенном исполнении;

2) необходимость закрытого исполнения часто диктуется требованием малошумности двигателя;

3) ряд приводных механизмов ограничивает размеры приводного двигателя;

4) некоторые из потребителей микромашин общего применения ставят основным условием к проектируемому двигателю невысокие температуры внешних частей.

Эти соображения отнюдь не исчерпывают факторов, определяющих выбор того или иного исполнения двигателя.

Требования малошумности и вместе с тем меньших размеров не могут быть полностью удовлетворены одновременно. В малошумных машинах приходится резко снижать индукцию B_δ, кроме того, отсутствие вентилятора, являющегося одним из главных источников шума в асинхронных машинах, тоже иногда влечет за собой необходимость увеличения основных размеров двигателя. Точно так же одновременно не могут быть удовлетворены требования малошумности, малых размеров и невысоких температур внешних частей. Закрытые микродвигатели являются практически малошумными.

Требование малошумности оказывает влияние на внутреннюю геометрию машины: определяет выбор соотношения чисел пазов на статоре и роторе Z_s/Z_R, применение скоса пазов; технологию изготовления (требуются плотная опрессовка пакета статора, запечка пакета, строгая равномерность зазора, уменьшение до минимума биения ротора в подшипниках, осевого люфта), а также на конструкцию двигателя (применение закрытого исполнения, подшипников скольжения). Следует иметь в виду, что при круговом вращающемся поле степень шумности меньше.

Стремясь удовлетворить несколько требований одновременно, приходится идти на компромиссное решение, удовлетворяя одно требование в ущерб некоторым другим.

Наиболее распространенным исполнением асинхронных микродвигателей общего применения в настоящее время

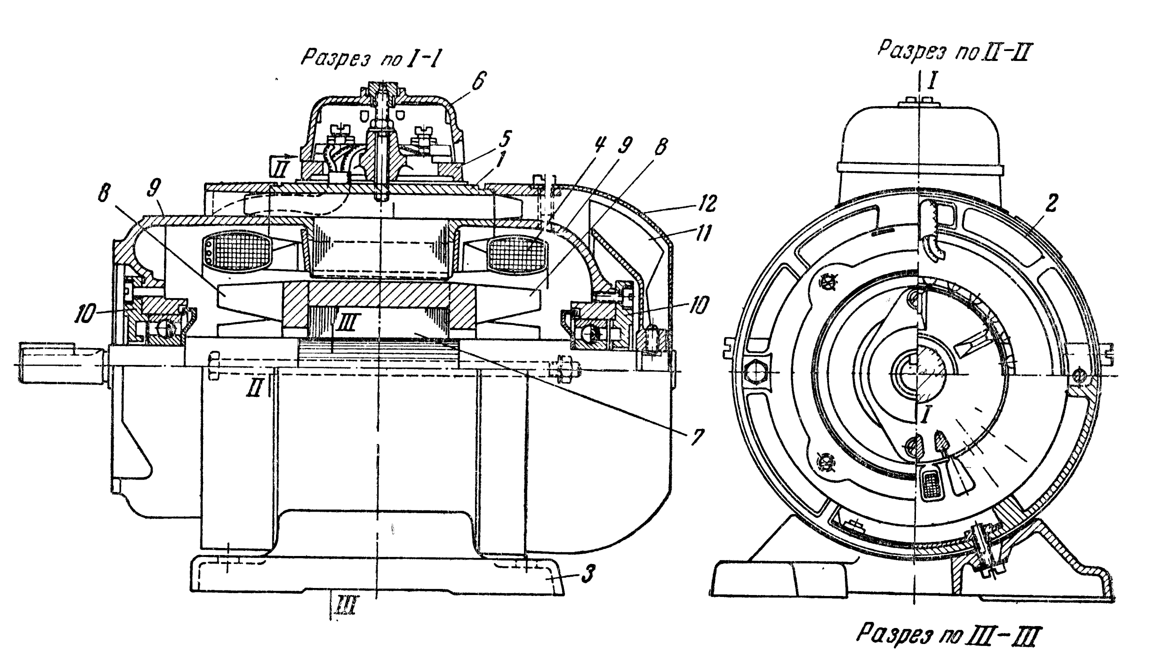


Рис. 11-9. Общий вид трехфазного асинхронного микродвигателя единой серии первого габарита (исполнение Щ2/Ф3).

является закрытое исполнение с обдувом и без него. В частности, единая серия малых электродвигателей изготовляется в закрытом обдуваемом исполнении (рис. 11-1 и 11-9); часть типов предусмотрена также в закрытом исполнении без обдува (рис. 11-3).

Следует отметить, что в ряде случаев двигатели не нуждаются в собственном вентиляторе, например: 1) при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы, когда вентиляция мало эффективна; 2) когда двигатель приводит во вращение механизм, при работе которого создаются дополнительные условия для охлаждения двигателя, т. е. возникает движение охлаждающего агента и др.

Остановимся несколько более подробно на конструкции двигателей единой серии (АОЛ, АОЛБ), представленных на рис. 11-9. Двигатели единой серии изготовляются мощностью 18—600 *вт* и по мощности являются нижним продолжением единой серии асинхронных двигателей АО; они имеют коэффициент нарастания мощности 1,5—2. Все двигатели выполняются пяти габаритов, т. е. пяти различных наружных диаметров: 70, 84, 102, 120 и 145 *мм* и имеют две длины. Они предназначаются для крепления к приводу в горизонтальном или вертикальном положении. Предусмотрены крепление двигателя на лапах, а также с помощью фланца на щите (исполнение Щ2/Ф3) и крепление только фланцем (исполнение Ф3). Исполнение Ф3 является одновременно и формой исполнений В1 и В2 для вертикальной установки со свободным концом вала, направленным вниз или вверх. Двигатели могут быть присоединены к приводимому механизму при помощи соединительной муфты или ременного шкива.

Однофазные двигатели имеют две обмотки на статоре: рабочую и пусковую. Пусковая обмотка включается только на период пуска и по достижении двигателем скорости вращения, близкой к номинальной, отключается с помощью центробежного выключателя (рис. 11-10). Пусковая обмотка должна находиться под током не более 3 *сек* во избежание недопустимого перегрева. При соблюдении этого условия допускаются три пуска подряд из холодного и один из горячего состояния двигателя.

На рис. 11-9 приведен общий вид трехфазного асинхронного двигателя первого габарита, имеющего исполнение Щ2/Ф3. Станина электродвигателя *1* образуется путем обливки алюминиевым сплавом сердечника статора мето-

дом литья под давлением. При обливке образуются аксиальные каналы *2* между наружной поверхностью сердечника и внутренней поверхностью станины. Лапы *3* из алюминиевого сплава крепятся к статору винтами. Обмотка статора *4* состоит из мягких секций, намотанных круглым проводом. Секции закладываются в статор через щели полузакрытых пазов. Обмотка двигателей 1-го, 2-го и нулевого габаритов (при $2p=2$) однослойная двухплоскостная; у однофазных двигателей нулевого габарита обмотка двухслойная. Изоляция обмотки класса А.

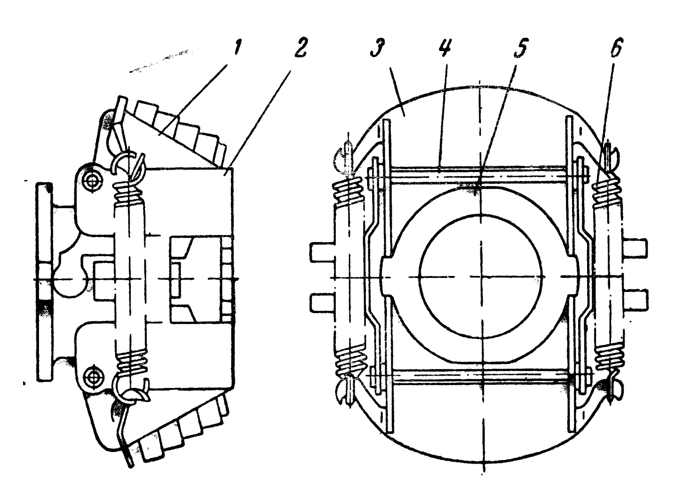


Рис. 11-10. Центробежный выключатель для двигателей нулевого и первого габаритов на 1 500 *об/мин.*

1—поводок; *2*—скоба; *3*—планка; *4*—ось; *5*—втулка пластмассовая; *6*—пружина.

У однофазных двигателей пусковая обмотка для повышения ее сопротивления выполняется проводом уменьшенного сечения. У двигателей с повышенным сопротивлением в пусковой обмотке часть обмотки выполнена бифилярно. Лобовые части пусковой обмотки для удобства ремонта располагаются над лобовыми соединениями главной обмотки. Концы обмотки выводятся к коробке выводов, состоящей из пластмассовой доски зажимов *5* и алюминиевой крышки *6*. Сердечник ротора *7* собирается на оправку, прессуется и заливается под давлением чистым алюминием. Одновременно отливаются короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки *8*. Подшипниковые щи-

ты *9*, крышки подшипников *10* и вентилятор *11* выполняются из силумина литьем под давлением. В щитах имеются внешние кольца для лучшего направления охлаждающего воздуха вдоль машины. В двигателях применяются шариковые подшипники.

Охлаждение машины осуществляется вентилятором *11*, расположенным на конце вала со стороны, противоположной приводу. Вентилятор защищен кожухом *12*. Внутренняя циркуляция воздуха осуществляется лопатками ротора.

Единая серия асинхронных микродвигателей имеет ряд существенных недостатков, связанных с конструктивным исполнением двигателей, геометрией машины и ее энергетическими показателями.

Первоначально серия предусматривала для трехфазных и однофазных двигателей единственное исполнение — закрытое обдуваемое. Серия была разработана применительно к четырем типам машин: АОЛ — трехфазным, АОЛБ —однофазным с пусковым сопротивлением, АОЛГ— однофазным с пусковой емкостью и АОЛД — однофазным конденсаторным с рабочей и пусковой емкостями. В серии не был предусмотрен однофазный конденсаторный двигатель с одной рабочей емкостью, не нуждающийся в отключающем пусковом устройстве.

До последнего времени заводы выпускали двигатели единой серии только двух типов: АОЛ и АОЛБ, что объяснялось отсутствием малогабаритных конденсаторов.

В серии не предусмотрено малошумное исполнение двигателей на подшипниках скольжения. К тому же степень шумности машины увеличивает внешний вентилятор.

В однофазных двигателях не предусматривалось встроенное приспособление для отключения пусковой фазы (центробежный выключатель).

В настоящее время только двигатели нулевого габарита, разработанные несколько позже во ВНИИ ЭМ, снабжены центробежным выключателем (рис. 11-10). Двигатели первого и второго габаритов выпускаются до сих пор без пускового устройства.

В двигателях единой серии двух- и четырехполюсные машины выполнены на одном штампе, что привело к значительному увеличению индукции в ярме двухполюсных машин. Геометрия листа статора при одном штампе не может быть оптимальной одновременно для машин с разными числами полюсов.

Ряд машин единой серии значительно недоиспользован, превышение температуры обмотки статора не превосходит 20—30° С. В двигателях применен провод марок ПЭЛБО и ПЭЛШО, сравнительно высок удельный вес изоляции в пазу, клин — деревянный.

Выполнение однослойных обмоток на статоре у однофазных двигателей приводит к возникновению значительных провалов в кривой моментов, вызванных третьей гармоникой поля.

У двигателей с повышенным сопротивлением пусковой фазы сравнительно невелика кратность пускового момента и высока кратность пускового тока.

Все возрастающий спрос на различные асинхронные микродвигатели требует серьезной работы по модернизации единой серии. Такая работа проводится во ВНИИ ЭМ. Чтобы удовлетворить потребность в большом количестве асинхронных двигателей малой мощности для встраивания в механизмы и приборы, были разработаны новые серии микродвигателей встроенного исполнения: АВ — трехфазные двигатели; АВЕ — однофазные конденсаторные двигатели двух исполнений:

1) с постоянно включенной емкостью — $C_р$ и пусковой емкостью $C_п$ и 2) с одной постоянно включенной емкостью $C_р$.

В зависимости от рода тока и скорости вращения двигатели имеют следующие мощности: трехфазные — 30—600 *вт* в двухполюсном исполнении на 3 000 *об/мин* и 18—400 *вт* в четырехполюсном исполнении на 1 500 *об/мин*; однофазные — соответственно при тех же скоростях вращения 18—400 и 10—270 *вт*. Напряжения двигателей: трехфазных — 380/220 и 220/127 *в*, однофазных 220 и 127 *в*. Серия однофазных и трехфазных двигателей включает 64 исполнения, различающихся номинальными значениями мощностей, скоростью вращения или напряжением.

Вся серия осуществлена на четырех наружных диаметрах: 70, 84, 102 и 120 *мм* при двух длинах для каждого диаметра.

Двигатели новых серий имеют закрытое необдуваемое исполнение. Их габариты и вес значительно снижены за счет новой конструкции корпуса, рационального раскроя стали, высокого использования активных материалов, а также отказа от обдува (вентилятора). Двигатели не имеют специального корпуса: пакет стали статора заливается алюминием, так что образуются нажимные кольца и стягивающие их четыре стержня (рис. 11-11).

Подшипниковые щиты также выполнены литьем под давлением. Двигатель в целом вписывается в квадрат со стороной, равной наружному диаметру стали статора, что обеспечивает минимальные габариты машины.

Двигатели предусмотрены с креплением фланцев на подшипниковом щите в форме Ф3 (эта форма одновременно является формой исполнения В1 и В2 для вертикальной установки со свободным концом вала вверх или вниз), а также в амортизационном исполнении.

Амортизационное исполнение позволяет подвесить двигатель в непосредственной близости к основному источнику вибраций и шума — подшипниковому узлу, что снижает вибрации и уровень шума. Двигатели могут быть изготовлены как на подшипниках качения, так и на подшипниках скольжения (самоустанавливающихся).

Концы обмотки выводятся свободно через уплотняющую резиновую втулку. Отсутствие зажимной колодки также уменьшает габариты двигателя.

В приложении 9 приводятся основные техни-

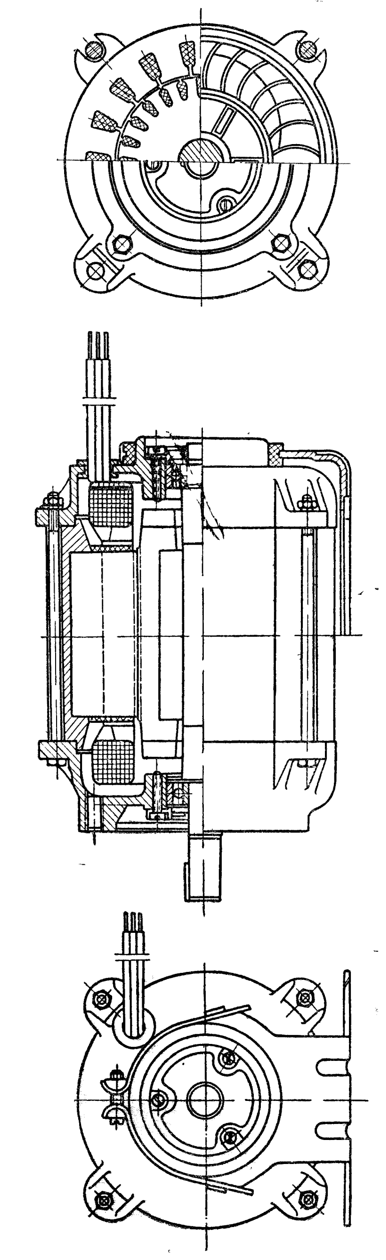


Рис. 11-11. Встраиваемый асинхронный микродвигатель серии АВ.

ческие данные и габаритные и установочные размеры двигателей серий АВ и АВЕ.

У двигателей АВ по сравнению с двигателями АОЛ, а также в двигателях АВЕ по сравнению с двигателями АОЛ удалось уменьшить габариты (во всех трех измерениях) на 30%; при этом улучшены электрические показатели $\eta \times \cos \varphi$.

Большую роль в создании малогабаритных двигателей сыграли более эффективное использование стали, применение обмоточных проводов марки ПЭВ-2 и новых изоляционных материалов, а также более рациональный выбор штампа для двух- и четырехполюсных машин (штампы ротора и статора не унифицированы полностью для машин с $2p=2$ и $2p=4$), оптимальный расход меди несколько увеличенный у четырехполюсных и уменьшенный у двухполюсных), применение двухслойных обмоток и т. п.

Кроме двигателей единой серии, отечественная промышленность выпускает значительное число единичных асинхронных микродвигателей применительно к различным бытовым устройствам.

В приложении приведены основные технические и конструктивные данные однофазных асинхронных микродвигателей с пусковым сопротивлением (приложение 10) и конденсаторных (приложение 11), выпускаемых в настоящее время.

Двигатели сгруппированы по области применения в порядке нарастающей мощности. Приложения охватывают двигатели для стиральных машин, холодильных установок, аппаратов звукозаписи и кино.

Кроме того, они содержат данные двигателей для привода медицинских аппаратов, в том числе однофазных двигателей с пусковым сопротивлением, трех- и двухскоростных однофазных конденсаторных. Часть этих двигателей имеет малошумное закрытое исполнение на подшипниках скольжения, другая часть — двигатели защищенного исполнения с вентилятором внутри машины или наружным вентилятором.

У большинства выпускаемых однофазных двигателей обмотка статора выполнена проводом ПЭВ-2. Для однофазных двигателей с пусковым сопротивлением предусмотрено устройство для отключения вспомогательной фазы (центробежный выключатель или реле).

Для выполнения задач, поставленных в семилетнем перспективном плане развития народного хозяйства, необходима большая работа по созданию малогабаритных малошумных асинхронных микродвигателей различных типов для бытовых приборов с высокими энергетическими показателями.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЗАКРЫТЫХ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

12-1. МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Тепловые расчеты микродвигателей чрезвычайно затруднены вследствие сложности действительной картины распределения и отвода тепла. Методы тепловых расчетов, применяемых для машин средней мощности [Л. 1 и 16], не могут быть непосредственно использованы для микродвигателей.

Для расчета закрытых асинхронных микродвигателей при длительном режиме работы можно рекомендовать метод тепловой схемы замещения [Л. 17 и 38] и метод эквивалентных потерь [Л. 16 и 17].

Метод тепловой схемы замещения основан на подобии закона Ома об электропроводности закону Фурье о теплопроводности. Метод эквивалентных потерь позволяет рассчитать превышение температуры обмотки с помощью коэффициентов, учитывающих долю соответствующих потерь, идущих на нагрев обмотки.

Для определения установившегося превышения температуры обмотки статора θ необходимо определить тепловое сопротивление машины $R_{\theta S}$ и эквивалентные потери $P_{экв}$:

$$\theta = R_{\theta S} P_{экв}; \qquad (12\text{-}1)$$

эквивалентные потери связаны с действительными потерями уравнением

$$P_{экв} = P_{MS} + k_{ст} P_{С} + k_R P_{MR} + k_д P_д, \qquad (12\text{-}2)$$

где $k_{ст}$, k_R, $k_д$ — коэффициенты соответствующих потерь. Влияние механических потерь обычно не учитывается.

Коэффициенты потерь и тепловое сопротивление машины $R_{\theta S}$ должны быть найдены экспериментально на опытных образцах.

Метод эквивалентных потерь особенно ценен для теплового расчета серии, так как опытные коэффициенты могут быть найдены на основе результатов испытания ограниченного числа образцов.

Метод тепловой схемы замещения может быть применен как для существующих, так и для проектируемых двигателей. Он позволяет рассчитать превышения температур в различных частях двигателя, что может быть использовано в процессе проектирования для правильного выбора соотношения отдельных потерь и величин тепловых сопротивлений.

В настоящей работе для закрытых двигателей рекомендуется (рис. 12-1) метод тепловой схемы замещения. Для расчета используется тепловая схема замещения машины в целом (рис. 12-2), предложенная для микромашин Р. Л. Котник [Л. 38] с небольшими изменениями [Л. 17].

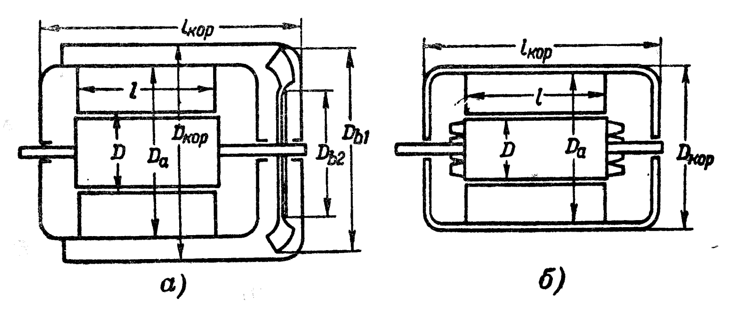


Рис. 12-1. К тепловому расчету размеров закрытых двигателей.
а — обдуваемого; *б* — необдуваемого.

Для проведения аналогии между тепловой и электрической схемами вводятся «генераторы потерь». Каждый генератор представляет собой источник теплового потока. Потенциал генератора является функцией создаваемых потерь.

Основное уравнение для схемы:

$$V = QR_t, \tag{12-3}$$

где V — потенциал, вызывающий поток тепловой энергии, соответствующий перепаду температур в данном элементе, °С;

Q — поток тепловой энергии через элемент, *вт*;

R_t — тепловое сопротивление, *град/вт*.

При составлении схемы сделан ряд допущений:

1. Лобовые части не передают тепла воздуху, находящемуся внутри двигателя.

2. Все потери ротора рассеиваются в воздухе, находящемся внутри двигателя, и затем передаются подшипниковым щитам и корпусу.

3. Все потери на трение, за исключением потерь от вентилятора, считаются потерями на трение о воздух внутри

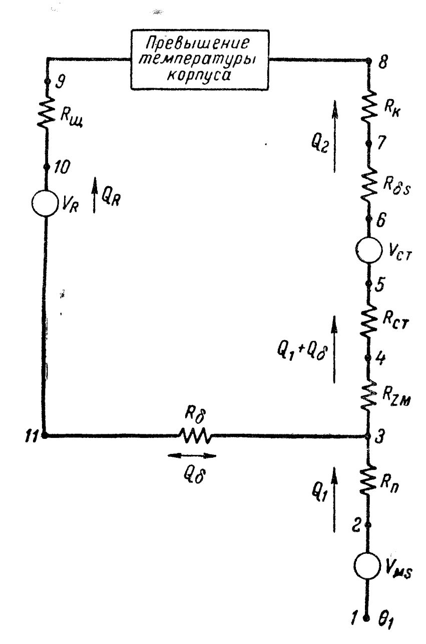


Рис. 12-2. Тепловая схема замещения.

V_{MS}, V_{MR} и $V_{ст}$—потенциалы генераторов потерь в меди статора и ротора и стали статора, °С. Тепловые сопротивления, *град·вт*; $R_щ$ — подшипникового щита; R_δ — воздушного зазора между статором и ротором; $R_к$ — корпуса, $R_{\delta,S}$ — воздушного зазора между пакетом статора и корпусом; $R_{ст}$ — стали статора; R_{ZM} — зубцового слоя для потерь в меди статора; $R_п$ — пазовой изоляции; Q_1, Q_2, Q_R, Q_δ — тепловые потоки соответствующих участков; θ_1 — превышение температуры обмотки в центре паза.

машины и при расчете схемы добавляются к потерям в роторе.

Тепловой расчет по методу тепловой схемы замещения сводится к определению с помощью эмпирических формул температуры корпуса [Л. 17] и тепловых сопротивлений схемы, а также к определению методом последовательных приближений превышений температуры в отдельных участках двигателя. Порядок расчета дается в следующем параграфе.

Формулы для определения температуры корпуса дают удовлетворительные результаты для симметричных машин (трехфазных, двухфазных), а также для однофазных машин при продолжительном режиме работы.

Метод расчета сопротивлений и тепловая схема даны для симметричных машин; применительно к однофазным машинам этот метод находится в стадии доработки.

В работе рассматривается тепловой расчет закрытых обдуваемых и необдуваемых двигателей (рис. 12-1). Задача расчета двигателей защищенного исполнения, а также открытых и встроенных должна быть разрешена в ближайшем будущем.

Следует также иметь в виду, что правильный выбор электромагнитных нагрузок обеспечивает допустимые превышения температуры в машине.

В настоящей работе (см. § 1-2) даются рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок (B_δ, A, Δ), основанные на обобщении опытных данных большого числа выполненных машин. Большое разнообразие конструктивных исполнений микромашин не позволяет в ряде случаев точно определить превышение температуры элементов машины расчетным путем и требует опытной проверки.

12-2. ФОРМУЛЯР ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Исходными данными при тепловом расчете микродвигателей являются:

1) размеры двигателя (рис. 12-1):

$D_а$ и D — наружный и внутренний диаметры статора, *см*;

l — длина пакета статора, *см*;

δ — воздушный зазор, *см*;

$D_к$ — наружный диаметр корпуса, *см*;

$l_к$ — длина корпуса, *см*;

$D_{в1}$ и $D_{в2}$ — внешний и внутренний диаметры вентилятора, *см*;

d_1 и d_2 — размеры паза по ширине, *см* (рис. 12-3);

h_{zS} — высота зубца, *см*;

$b_{zср}$ — средняя ширина зубца, *см*;

h_{aS} — высота ярма статора, *см*;

$d_{гол}$ и $d_{изол}$ — диаметры голого и изолированного проводов обмотки статора, *см*;

k_c — коэффициент заполнения пакета сталью;

Z_S — число пазов статора;

2) потери:

P_{MS} — потери в меди статора, *вт*;

$P_{ст}$ — потери в стали, *вт*;

$P_{мех}$ — механические потери;

P_{MR} — электрические потери в роторе;

$P_д$ — дополнительные потери;

ΣP — сумма потерь.

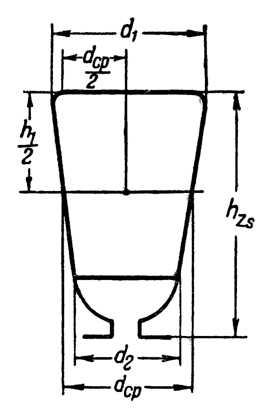


Рис. 12-3. К расчету теплового сопротивления изоляции проводников в пазу.

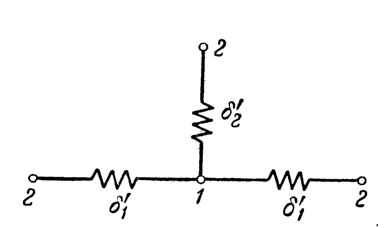


Рис. 12-4. Тепловая схема замещения паза.

1 — центр паза; 2 — внутренняя поверхность.

Тепловой расчет трехфазных асинхронных микродвигателей при длительном режиме работы может быть выполнен по формуляру. Формуляр включает:

1) расчет постоянных схем тепловых сопротивлений и потенциалов генераторов (табл. 12-1а и 12-1б);

2) расчет температуры корпуса (табл. 12-2);

3) расчет по схеме (табл. 12-3):

а) тепловых потоков схемы (см. рис. 12-2) в предположении, что поток через воздушный зазор отсутствует ($Q_\delta = 0$) (первое приближение);

Таблица 12-1а

Расчет постоянных схемы

Определение тепловых сопротивлений

Тепловые сопротивления	Формулы	Примечания
Изоляции проводников в пазу	Число условных проводников и толщина изоляции по пути $\frac{d_{ср}}{2}$ (рис. 12-3), где $d_{ср} = \frac{d_1 + d_2}{2}$; $$n_1 = \frac{d_{ср}}{2d_{из}};\quad \delta_1' = \delta'(n_1 - 1) + \frac{\delta'}{2};$$ δ' — двусторонняя толщина изоляции проводников. Число условных проводников и толщина изоляции по пути $\frac{h_{ZS}}{2}$: $$n_2 = \frac{h_{ZS}}{2d_{из}};\quad \delta_2' = \delta'(n_2 - 1) + \frac{\delta'}{2}.$$ Эквивалентная толщина изоляции в соответствии с тепловой схемой замещения паза (рис. 12-4) $$\delta_э = \frac{\delta_1'\delta_2'}{2\delta_2' + \delta_1'}.$$	Предполагается, что потери в меди статора сосредоточены в центре паза и передаются к боковым и нижней стенкам паза. Провода круглого сечения заменяются условными прямоугольными проводами того же сечения, что и круглые провода, и с одинаковой толщиной изоляции

Продолжение табл. 12-1а

Тепловые сопротивления	Формулы	Примечания
	Тепловое сопротивление изоляции проводников в пазу $$R_{из} = \frac{\delta_э}{Z_S l_1 \Pi k_t'},$$ где $l_1 = l_S k_c$; периметр паза $\Pi = d_1 + 2h$; k_t' — коэффициент теплопроводности (для ПЭВ-2 $k_t' = 0{,}0004$)	
Зубцового слоя статора для потерь в меди статора	Сопротивление зубцового слоя статора $$R_Z = \frac{h_{ZS}}{S_Z k_{Fe}},$$ где $S_Z = Z_S b_{Zср} l_1$; k_{Fe} — коэффициент теплопроводности стали, равный 0,58. Сопротивление зубцового слоя для потерь в меди статора $$R_{ZM} = R_Z \frac{2h_{ZS}}{\Pi}$$	Предполагается, что тепло отводится боковыми стенками и нижней частью паза пропорционально их длинам (в сечении паза)

Продолжение табл. 12-1а

Тепловые сопротивления	Формулы	Примечания
Пазовой изоляции	$$R_п = \frac{\delta_п}{Z_S \Pi l_1 k'_{t2}},$$ где $\delta_п$ — толщина пазовой изоляции; k'_{t2} — коэффициент теплопроводности пазовой изоляции. Для изоляции электрокартон, электрокартон+триацетатная пленка, электрокартон+лакоткань можно принять $k'_{t2} = 0,0005$	
Спинки статора	$$R_с = \frac{h_{aS}}{S_{aS} k_{Fe}},$$ где $S_{aS} = \pi D_{a1} l_1$; $D_{a1} = \frac{D_а + D + 2h_{ZS}}{2}$	
Зазора (между ротором и статором)	$$R_\delta = \frac{\delta}{S_\delta k_{tв}},$$ где δ — воздушный зазор между ротором и статором; $k_{tв}$ — коэффициент теплопроводности воздуха; $$k_{tв} = 0,00023.$$ $$S_\delta = \pi D l$$	

Тепловые сопротивления	Формулы	Примечания
Зазора между пакетом статора и корпусом	$R_{\delta S} = \frac{\delta_S}{S_{\delta S} k_{t\text{в}}}$, где $S_{\delta S} = \pi D_a l_S$; средний воздушный зазор между пакетом статора и корпусом может быть принят $\delta_{S\,\text{ср}} = 0{,}001$	
Корпуса	$R_\text{к} = \frac{b_\text{кор}}{\pi D_\text{кор.ср} l'_\text{кор} k_{Fe}}$, где $b_\text{к}$ — толщина корпуса; $D_\text{к.ср}$ — средний диаметр корпуса; $l'_\text{к}$ — длина корпуса (без подшипниковых щитов)	Сопротивления в графах 1—7 обусловлены только теплопроводностью
Подшипникового щита	$R_\text{щ} = 0{,}001$	Сопротивления подшипникового щита и ротора обусловлены конвекцией и теплопроводностью. Их расчет чрезвычайно сложен; в формуляре даются средние опытные значения, полученные на машинах малой мощности единой серии
Ротора	$R_R = 0{,}5 \div 0{,}6$	

В формулах все размеры в *см*, коэффициенты теплопроводности — в *вт/град·см*, тепловые сопротивления — в *град/вт*. Тепловые сопротивления кроме $R_\text{щ}$ и R_R обусловлены только теплопроводностью.

Таблица 12-16

Определение потенциалов генераторов

Потенциал „генератора“	Формулы	Примечания
Потери в стали статора	$V_c = 0{,}5 P_c R_{cS}$, где полное сопротивление стали статора $R_{cS} = R_c + R_Z$	Эмпирический коэффициент 0,5 учитывает, что потери в стали являются распределенными. V_c — превышение температуры стали статора над температурой окружающего воздуха
Потери в меди статора	$V_{мS} = P'_{мS} R_{из}$, где $P'_{мS} = P_{мS} + 0{,}5 P_д$	$V_{мS}$ — превышение температуры в центре паза над температурой внешней части проводников, прилегающих к изоляции паза
Потери в роторе	$V_R = P_R R_R$, где $P_R = P_{мR} + P_{мех} + 0{,}5 P_д$; $P_{мех}$ — механические потери без учета потерь от вентилятора	V_R — превышение температуры ротора над температурой воздуха внутри двигателя

б) тепловых потенциалов (перепадов температур) на различных элементах схемы;

в) теплового потока через воздушный зазор путем сравнения потенциалов с двух сторон воздушного зазора и определение нового распределения тепловых потоков (второе приближение);

г) среднего превышения температуры обмотки статора.

Таблица 12-2

Расчет температуры корпуса

№ п.п.	Порядок расчета	Формулы	Примечания
1	Задается окружающая температура воздуха	$t_{окр}$	
2	Вычисляется предварительно превышение температуры корпуса	$\theta'_{ск} = \frac{\Sigma P}{S_к k_S k_1}$, где полная поверхность двигателя $S_к = \frac{\pi D^2_{кор}}{2} + \pi D_{кор} l_{кор}$; $k_1 = 0{,}56 \cdot 10^{-3} D_к^{0,5}$; $k_S = 1$ — для необдуваемых двигателей; $k_S = \frac{7{,}06}{k_{п1}} \cdot 10^{-4} n (D_{в1} - D_{в2})$ — для обдуваемых двигателей; $k_{п1} = 1{,}5$ для $2p = 2$; $k_{п1} = 1{,}25$ для $2p = 4$	При расчете $\theta'_{ск}$ используем ряд эмпирических коэффициентов: k_1; k_S; $k_{п1}$. Коэффициент k_S учитывает увеличение поверхности из-за обдува; $k_{п1}$ учитывает влияние скорости вращения двигателя
3	Вычисляется излучаемое тепло	$P_л = 1{,}63 k_{изл} S_к D_к^{0,5} \left[\left(\frac{t_2}{1\,000}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{1\,000}\right)^4\right]$; для машин, окрашенных в зеленый, синий и серый цвета, $k_{изл} = 0{,}9$, в серебряный цвет — $k_{изл} = 0{,}5$; t_1 и t_2 — температура поверхности корпуса и окружающая температура по абсолютной шкале температур: $t_2 = t_1 + \theta'_{ск}$; $t_1 = 273 + t_{окр}$	$k_{изл}$ — относительная излучающая способность

№ п.п.	Порядок расчета	Формулы	Примечания
4	Находится тепло, рассеиваемое путем конвекции	$P_к = \Sigma P - P_л$	
5	Определяется среднее превышение температуры корпуса	$\theta_{ск} = \left(\frac{5\,360 k_{п2} P_к}{S_к k_s D_к^{0,5}}\right)^{0,8}$; для $2p = 2$ $k_{п2} = 0,87$; для $2p = 4$ $k_{п2} = 0,94$	Коэффициент $k_{п2}$ эмпирический. Если превышение температуры $\theta_{ск}$ не соответствует $\theta'_{ск}$, то пп. 3—5 пересчитываются (второе приближение) в предположении, что $\theta'_{ск}$ равно полученному **в** п. 5 или промежуточному значению
6	Определяется максимальная (расчетная) температура корпуса	$\theta_{рк} = \theta_{ск} k_R$; для необдуваемых машин $k_R = 0,89\left(\frac{l_к}{D_к}\right)^{0,5}$; для обдуваемых машин $k_R = 0,906\left(\frac{l_к}{D_к}\right)^{0,5}$; $t_{рк} = \theta_{рк} + t_{окр}$	Коэффициент k_R эмпирический

Температура везде в градусах стоградусной шкалы, размеры — в сантиметрах, мощности — в ваттах.

Таблица 12-3

Определение превышений температуры на различных участках двигателя

№ точки в тепловой схеме	Наименование участка	Формулы		Примечания
		Первое приближение	Второе приближение	
8 и *9*	Наружная поверхность корпуса	$V_8=V_9=\theta_{рк}$	$V_8=V_9=\theta_{рк};\ Q_\delta=\frac{t(V'_3-V'_{11})}{R_\delta}$	1) Определение превышений температур отдельных участков производится методом последовательных приближений по схеме рис. 12-2. Во втором приближении, сравнивая потенциалы в точках *11* и *3*, находим тепловой поток через воздушный зазор $\pm Q_\delta=\frac{V_3-V_{11}}{R_\delta}$; затем определяем новые значения тепловых потоков Q_2, Q_R и превышения температур во всех точках
7	Внутренняя поверхность корпуса	$V'_7=V_8+Q'_2R_к;\quad Q'_2=Q'_1+P_S;\ Q'_1=P_{мS}+\frac{1}{2}P_д$	$V_7=V_8+Q_2R_к;\ Q_2=Q_1+P_с\pm\pm Q_\delta;\ Q_1=Q'_1$	
6	Наружная поверхность пакета стали	$V'_6=V_7+Q'_2R_{\delta S}$	$V_6=V_7+Q_2R_{\delta S}$	
3	Наружная поверхность зубцов	$V'_3=V'_6+V'_{ст}+Q'_1(R_{ст}++R_{Zн})$	$V_3=V_6+V_{ст}+(Q_1+Q_\delta)(R_{ст}++R_{Zн});\ Q'_1=Q_1$	
2	Внешняя часть проводников паза статора	$V'_2=V_3+Q'_1R_п$	$V_2=V_3+Q_1R_п$	
1	Проводники в центре паза	$V'_1=V'_2+V_{мS}$	$V_1=V_2+V_{мS};\ V_1=\theta_1$	
10	Внутренняя поверхность щита	$V'_{10}=V_9+Q'_RR_щ;$ $Q'_R=P_{мR}+\frac{1}{2}P_д+P_{мех}$	$V_{10}=V_9+Q_RR_щ;\ Q_R=Q'_R\pm Q_\delta$	
11	Наружная поверхность ротора	$V'_{11}=V'_{10}+V_R$	$V_{11}=V_{10}+V_R$	

Так как в закрытых машинах температура лобовых частей выше температуры меди в центре паза, то среднее превышение температуры обмотки статора равно:

$$\theta_{cS} = k_з \theta_1, \qquad (12\text{-}4)$$

где $k_з = 1{,}05 \div 1{,}25$ (в среднем — 1,15);

θ_1 — температура меди в центре паза (по табл. 12-3).

Среднее превышение температуры обмотки статора не должно превосходить пределов, указанных в ГОСТ 183-55.

Методика теплового расчета иллюстрируется примером в § 13-5.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

13-1. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПУСКОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Проектное задание

1. Номинальные данные:
номинальная полезная мощность $P_н = 30$ *вт*;
скорость вращения (синхронная) $n_c = 3\,000$ *об/мин*;
число фаз $m = 1$;
частота сети $f = 50$ *гц*;
номинальное напряжение $U_н = 220$ *в*.
2. Режим работы — длительный.
3. Условия работы: окружающая температура $+35°$ С.
4. Особые условия: а) малошумность; б) машина выполняется на общем штампе с четырехполюсной ($k_D \approx 0{,}6$)*.
5. Положение вала — вертикальное.
6. Назначение: привод аппарата для бактериологического анализа воздуха.
7. Исполнение закрытое, охлаждение естественное.

Определение главных размеров

Для однофазной машины с пусковым элементом $\beta_1 = 2{,}5$.

Номинальная мощность эквивалентной трехфазной машины

$$P_{нIIIэ} = \beta_1 P_н = 2{,}5 \cdot 30 = 75 \text{ вт}.$$

По кривой рис. 1-1 находим энергетический к. п. д. $\eta_{III} \cos \varphi_{III} = 0{,}435$.

---

*. В примере рассматривается реальный двигатель, спроектированный на кафедре электрических машин МЭИ, для которого данное условие задано.

Тогда расчетная мощность эквивалентной трехфазной машины

$$P_{S\,\text{IIIэ}} = \frac{P_{\text{нIIIэ}}}{\eta_{\text{III}} \cos \varphi_{\text{III}}} = \frac{75}{0,435} = 172,5 \text{ ва}.$$

Учитывая условия малошумности, принимаем $B_\delta = 4\,000$ *гс*.

Выбираем линейную нагрузку:

$$A = 110 \text{ а/см}; \ \lambda = \frac{l}{\tau} = 0,47; \ \ k_D = 0,58$$

и определяем наружный диаметр статора:

$$D_\text{а} = \frac{8,15}{k_D} \sqrt[3]{\frac{P'_{S\,\text{IIIэ}} p}{\frac{B_\delta}{1\,000} A\lambda \frac{n_\text{c}}{1\,000}}} =$$

$$= \frac{8,15}{0,58} \sqrt[3]{\frac{172,5 \cdot 1}{\frac{4\,000}{1\,000} \cdot 110 \cdot 0,47 \cdot 3}} = 92 \text{ мм}.$$

Из условия оптимального раскроя листа берем наружный диаметр $D_\text{а} = 89$ *мм*.

Проверяем машинные постоянные C и C' при выбранном наружном диаметре статора по (1-2) и (1-5):

$$C = \frac{D_\text{а}^3 \lambda \pi k_D}{P'_{S\,\text{IIIэ}} 2p} = \frac{8,9^3 \cdot 0,47 \cdot 3,14 \cdot 0,58}{172,5 \cdot 2} = 1,75;$$

$$C' = \frac{(k_D D_\text{а})^3 \lambda\pi}{2p \frac{P_\text{н}}{n_\text{c}}} = \frac{(0,58 \cdot 8,9)^3 \cdot 0,47 \cdot 3,14}{2 \frac{30}{3\,000}} = 10,4 \cdot 10^3.$$

Сравнение полученных „машинных постоянных“ C и C' с их значениями по кривым на рис. 1-5 и 1-6 показывает, что проектируемая машина мало отличается от существующих.

Внутренний диаметр статора

$$D = k_D D_\text{а} = 0,58 \cdot 89 = 51,5 \text{ мм}.$$

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 51,5}{2} = 81 \text{ мм} = 8,1 \text{ см}.$$

Расчетная длина статора

$$l = \lambda\tau = 0,47 \cdot 81 = 38 \text{ мм} = 3,8 \text{ см}.$$

Воздушный зазор выбираем $\delta = 0,03$ *см*.

Обмотка, пазы и ярмо статора

Выбираем число пазов статора и ротора:

$$Z_S = 18 \text{ и } Z_R = 15.$$

Указанное соотношение пазов $\frac{Z_S}{Z_R}$ имеется в табл 2-1 и осуществлено в машинах единой серии.

Для двигателя с пусковым сопротивлением число пазов на статоре распределяется между главной (рабочей) и вспомогательной (пусковой) фазами в отношении 2 : 1; $Z_A = 12$; $Z_B = 6$.

Число пазов на полюс в рабочей обмотке

$$Q_A = \frac{\frac{2}{3} Z_S}{2p} = \frac{\frac{2}{3} \cdot 18}{2} = 6.$$

Число пазов на полюс в пусковой обмотке

$$Q_B = \frac{\frac{1}{3} Z_S}{2p} = \frac{\frac{1}{3} \cdot 18}{2} = 3.$$

Выбираем на статоре двухслойную обмотку (рис 13-1) с укороченным шагом

$$y = \frac{2}{3} \tau = \frac{2}{3} \cdot 9 = 6.$$

Обмоточный коэффициент главной обмотки

$$k_{о\,A} = \frac{\sin \frac{\pi p Q_A}{Z_S}}{Q_A \sin \frac{\pi p}{Z_S}} \sin \beta \frac{\pi}{2} = \frac{\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 6}{18}}{6 \sin \frac{\pi \cdot 1}{18}} \sin \frac{2}{3} \frac{\pi}{2} = 0{,}722.$$

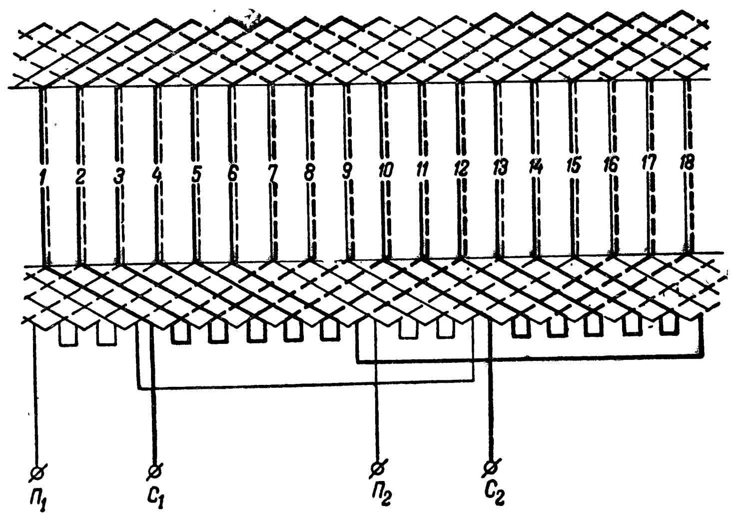


Рис. 13-1. Схема обмотки однофазного двигателя с пусковым сопротивлением при $Z_S = 18$; $2p = 2$; $Q_A = 6$; $Q_B = 3$.

Принимаем $k_z = 1{,}1$; тогда согласно рис. 2-18 $\alpha_\delta = 0{,}665$; $k_B = 1{,}1$ и магнитный поток

$$\Phi = \alpha_\delta \tau l B_\delta = 0{,}665 \cdot 8{,}1 \cdot 3{,}8 \cdot 4\,000 = 0{,}82 \cdot 10^5 \text{ мкс}.$$

Принимая $k_E = 0{,}8$, находим число витков главной обмотки:

$$w_{SA} = \frac{U_н k_E \cdot 10^8}{4 k_B f \Phi k_{о\,A}} = \frac{220 \cdot 0{,}8 \cdot 10^8}{4 \cdot 1{,}1 \cdot 50 \cdot 0{,}82 \cdot 10^5 \cdot 0{,}722} = 1\,347.$$

Берем $w_{SA} = 1\,344$.

Сечение меди в пазу

Определяем число проводников в пазу, приняв число параллельных ветвей $a = 1$:

$$u_{пA} = \frac{w_{SA} a}{p Q_A} = \frac{1\,344 \cdot 1}{1 \cdot 6} = 224.$$

По кривой на рис. 1-2 для $P_н = 30$ *вт* находим энергетический к. п. д. однофазной машины $\eta_I \cos \varphi_I = 0{,}3$; тогда расчетная мощность

$$P'_S = \frac{P_н}{\eta_I \cos \varphi_I} = \frac{30}{0{,}3} = 100 \text{ ва}.$$

Номинальный ток в главной обмотке (предварительно)

$$I_{н\,A} = \frac{P'_s}{m U_н} = \frac{100}{1 \cdot 220} = 0{,}455 \text{ а}.$$

Выбираем плотность тока $\Delta_{SA} = 6$ *а/мм²* и находим сечение провода:

$$S'_{SA} = \frac{I_{нA}}{a \Delta_{SA}} = \frac{0{,}455}{1 \cdot 6} = 0{,}0758 \text{ мм}^2.$$

Округляем сечение провода до ближайшего стандартного:

$$S_{SA} = 0{,}0755 \text{ мм}^2.$$

Диаметр провода $d_{гол} = 0{,}31$ *мм*.

Выбираем провод марки ПЭВ-2; $d_{из} = 0{,}36$ *мм*.

Сечение меди в пазу

$$S_{MSA} = S_{SA} u_{п\,A} = 0{,}0755 \cdot 224 = 16{,}9 \text{ мм}^2.$$

Пазы и ярмо статора

По сечению меди в пазу подбираем паз. Паз — полуовальный. Ширина зубца выбрана $b_{ZS} = 3{,}3$ *мм*.

Высота ярма (предварительно)

$$h_{aS} \approx 0{,}2 b_{ZS} \frac{Z_S}{p} = 0{,}2 \cdot 3{,}3 \cdot \frac{18}{1} = 11{,}9 \text{ мм.}$$

В процессе расчета паза и магнитной цепи величина спинки взята

$$h_{aS} = 10{,}25 \text{ мм.}$$

Выбираем размеры прорези:
высота $h_{\text{щ}\,S} = 0{,}5$ *мм*; ширина

$$b_{\text{щ}\,S} = d_{\text{из}} + 1{,}1 \div 1{,}5 = 0{,}36 + 1{,}1 \div 1{,}5 = 1{,}46 \div 1{,}86 \text{ мм.}$$

Принимаем $b_{\text{щ}\,S} = 1{,}5$ *мм*.
Размеры полуовального паза:

$$d_1 = \frac{\pi (D + 2h_{\text{щ}\,S}) - b_{ZS} Z_S}{Z_S - \pi} =$$

$$= \frac{3{,}14(51{,}5 + 2 \cdot 0{,}5) - 3{,}3 \cdot 18}{18 - 3{,}14} = 7{,}15 \text{ мм;}$$

$$b_2 = \frac{\pi (D_a - 2h_{aS})}{Z_S} - b_{ZS} = \frac{3{,}14(89 - 2 \cdot 10{,}25)}{18} - 3{,}3 = 8{,}65 \text{ мм.}$$

Высота паза

$$h_{\text{п}\,S} = \frac{D_a - D - 2h_{aS}}{2} = \frac{89 - 51{,}5 - 2 \cdot 10{,}25}{2} = 8{,}5 \text{ мм;}$$

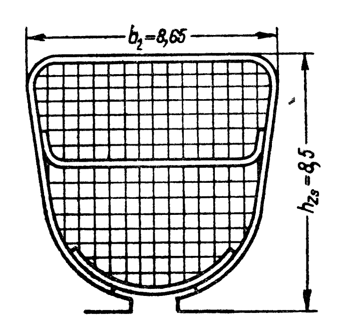


Рис. 13-2. Эскиз паза с изоляцией.

$$h_{12} = h_{\text{п}S} - 0{,}5(d_1 + 2h_{\text{щ}\,S}) = 8{,}5 - 0{,}5(7{,}15 + 2 \cdot 0{,}5) = 4{,}43 \text{ мм.}$$

Площадь паза

$$S_{\text{п}\,S} = \frac{\pi d_1^2}{8} + 0{,}5 h_{12}(d_1 + b_2) =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot 7{,}15^2}{8} + 0{,}5 \cdot 4{,}43(7{,}15 + 8{,}65) = 55{,}1 \text{ мм}^2.$$

На рис. 13-2 приведен спроектированный паз; в табл. 13-1 дана изоляция паза.

Таблица 13-1

Спецификация паза

Наименование	Материал	Размеры, *мм*	Примечание
Провод	ПЭВ-2	$d_{гол}=0,3$ $d_{из}=0,36$	
Коробка пазовая	Пленкокартон	0,2	Односторонняя изоляция паза
Прокладка	»	0,2	
Пазовая крышка	»	0,2	

Площадь изоляции паза $S_{из}=9$ *мм*².

Коэффициент заполнения паза

$$k_{зап}=\frac{d_{из}^2 u_п}{S_{п\,S}-S_{из}}=\frac{0,36^2\cdot 224}{55,1-9}=0,635<0,7.$$

Сопротивления обмоток статора и ротора.

Сопротивления главной обмотки статора

Берем значение коэффициентов k_1 и B из табл 4-1 и определяем среднюю длину лобовой части главной обмотки:

$$l_л=k_1\tau_у+2B=k_1\frac{\pi(D+h_{пS})}{2p}\beta+2B=$$

$$=1,2\cdot\frac{3,14(5,15+0,85)}{2}\cdot\frac{2}{3}+2\cdot 1=9,48\ см.$$

Средняя длина полувитка

$$l_{ср}=l+l_л=3,8+9,48=13,28\ см.$$

Общая длина проводников фазы

$$L_{SA}=2l_{ср}w_{SA}\cdot 10^{-2}=2\cdot 13,28\cdot 1\,344\cdot 10^{-2}=356\ м.$$

Активное сопротивление главной обмотки статора

$$r_{SA_{75}}=\rho\frac{L_{SA}}{S_{SA}a}=\frac{1}{46}\cdot\frac{356}{0,0755\cdot 1}=102,5\ ом.$$

Определяем коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния на основании расположения меди в пазу и расчета коэффициентов k_β и $k_{\beta 1}$ по формулам табл. 4-3:

$$k_\beta=1-\frac{3}{8Q_A}\left(\frac{Z_S}{2p}-y\right)=1-\frac{3}{8\cdot 6}\left(\frac{18}{2}-6\right)=0,813;$$

$$k_{\beta 1}=1-\frac{1}{2Q_A}\left(\frac{Z_S}{2p}-y\right)=1-\frac{1}{2\cdot 6}\left[\frac{18}{2}-6\right]=0,75.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния

$$\lambda_п = \left[\frac{h_1}{3d_1}k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_{щ\ S}}{2d_1} + \frac{h_2}{d_1} + \frac{h_{щ\ S}}{b_{щ\ S}}\right)k_{\beta 1}\right] =$$

$$= \frac{3,83}{3\cdot 7,15}\cdot 0,813 + \left(0,785 - \frac{1,5}{2\cdot 7,15} + \frac{0,3}{7,15} + \frac{0,5}{1,5}\right)0,75 = 0,938.$$

Зубцовое деление статора

$$t_S = \frac{\pi D}{Z_S} = \frac{3,14\cdot 51,5}{18} = 9 \text{ мм}.$$

Зубцовое деление ротора

$$t_R = \frac{\pi(D - 2\delta)}{Z_R} = \frac{3,14(51,5 - 2\cdot 0,3)}{15} = 10,6 \text{ мм}.$$

Выполняем скос пазов на статоре на одно зубцовое деление ротора:

$$b_{ск} = t_R = 10,6 \text{ мм} = 1,06 \text{ см};$$

$$\alpha_{ск} = \frac{2pb_{ск}}{D - 2\delta} = \frac{2\cdot 10,6}{51,5 - 2\cdot 0,3} = 0,417 \text{ рад}.$$

Коэффициент скоса

$$k_{ск} = \frac{2\sin\frac{\alpha_{ск}}{2}}{\alpha_{ск}} = \frac{2\sin 11°57'}{0,417} = 0,99,$$

$$k_{о\ R} = k_{ск} = 0,99.$$

Находим коэффициенты F, F_1, G, G_1 по кривым на рис. 4-3 — 4-6 для

$$\frac{t_R}{t_S} = \frac{10,6}{9} = 1,18$$

и

$$\beta_{ск} = \frac{b_{ск}}{t_R} = \frac{10,6}{10,6} = 1.$$

$$F = 1,9;\ F_1 = 0,26;\ G = 1;\ G_1 = 0,41.$$

Находим коэффициент Δ_Z для

$$\frac{b_{щ\ S}}{\delta} = \frac{1,5}{0,3} = 5$$

и

$$\frac{b_{щ\ S}}{t_S} = \frac{1,5}{9} = 0,167$$

по кривым на рис. 4-7:

$$\Delta_Z = 0,06.$$

Коэффициент $N = 1{,}5 \left(\text{при } Q_A = y;\ Q_A + y \neq \frac{Z_S}{p}\right)$.

Коэффициент ξ_S по формуле табл. 4-4 равен:

$$\xi_S = 2\left(Fk_{\beta 1} - \frac{F_1 N}{2Q_A}\right) - \Delta_Z\left(Gk_{\beta 1} - \frac{G_1 N}{2Q_A}\right) -$$

$$-\frac{4Q_A p}{Z_S} k_{\text{o}\,A}^2 \left(\frac{t_R}{t_S}\right)^2 [1 + \beta_{\text{ск}}^2 k_{\text{o}\,R}^2] = 2\left(1{,}9 \cdot 0{,}75 - \frac{0{,}26 \cdot 1{,}5}{2 \cdot 6}\right) -$$

$$-0{,}06\left(1 \cdot 0{,}75 - \frac{0{,}41 \cdot 1{,}5}{2 \cdot 6}\right) -$$

$$-\frac{4 \cdot 6 \cdot 1}{18} \cdot 0{,}722^2 \left(\frac{10{,}6}{9}\right)^2 \cdot (1 + 1 \cdot 0{,}99^2) = 0{,}82.$$

Принимаем прорезь паза ротора $b_{\text{щ}\,R} = 1{,}5$ *мм* и определяем коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta S} = \frac{5 + \frac{b_{\text{щ}\,S}}{\delta}}{5 + \frac{b_{\text{щ}\,S}}{\delta}\left(\frac{t_S - b_{\text{щ}\,S}}{t_S}\right)} = \frac{5 + \frac{1{,}5}{0{,}3}}{5 + \frac{1{,}5}{0{,}3}\left(\frac{9 - 1{,}5}{9}\right)} = 1{,}09;$$

$$k_{\delta R} = \frac{5 + \frac{b_{\text{щ}\,R}}{\delta}}{5 + \frac{b_{\text{щ}\,R}}{\delta}\left(\frac{t_R - b_{\text{щ}\,R}}{t_R}\right)} = \frac{5 + \frac{1{,}5}{0{,}3}}{5 + \frac{1{,}5}{0{,}3}\left(\frac{10{,}6 - 1{,}5}{10{,}6}\right)} = 1{,}07;$$

$$k_\delta = k_{\delta S} \cdot k_{\delta R} = 1{,}09 \cdot 1{,}07 = 1{,}17.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_\delta = \frac{t_S}{11{,}9\delta k_\delta}\ \xi_S = \frac{9}{11{,}9 \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}17} \cdot 0{,}82 = 1{,}77.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\text{л}} = 0{,}28\left(1 - 0{,}6\frac{2pQ_A}{Z_S}\right)\frac{Q_A}{l}(l_{\text{л}} - 0{,}64\beta\tau) =$$

$$= 0{,}28\left(1 - 0{,}6 \cdot \frac{2 \cdot 6}{18}\right) \cdot \frac{6}{3{,}8} \cdot \left(9{,}48 - 0{,}64 \cdot \frac{2}{3} \cdot 8{,}1\right) = 1{,}6.$$

Суммарный коэффициент магнитной проводимости

$$\Sigma\lambda = \lambda_{\text{п}} + \lambda_\delta + \lambda_{\text{л}} = 0{,}938 + 1{,}77 + 1{,}6 = 4{,}31.$$

Индуктивное сопротивление главной обмотки статора

$$x_{SA} = 0,158\frac{f}{100}\left(\frac{w_{SA}}{100}\right)^2\frac{l}{pQ_A}\Sigma\lambda =$$

$$= 0,158\cdot\frac{50}{100}\cdot\left(\frac{1\,344}{100}\right)^2\frac{3,8}{1\cdot 6}\cdot 4,31 = 38,8 \text{ ом}.$$

Проверяем k_E с помощью векторной диаграммы на рис. 2-14. По диаграмме, построенной при $\cos\varphi_н = 0,68$ (см. рис. 2-16) и $I_н = 0,455$ *а*, получаем $k_E = 0,8$, равное предварительно принятому значению.

Выбор размеров ротора

Выбираем номинальное скольжение $s_н = 0,04$.

По кратности максимального момента $m_m = 2,35$ из кривой на рис. 3-4 находим $s_m = 0,2$.

По кривой $\frac{r_R}{x_к} = f(s_m)$ рис. 3-5 находим для $s_m = 0,2$ отношение $\frac{r_R}{x_к} = 0,623$.

Приняв $x_к = 2\ x_S = 2\cdot 38,8 = 77,6$ *ом*, находим предварительно:

$$r_R = 0,623\cdot 77,6 = 48,3 \text{ ом}.$$

По найденному сопротивлению ротора $r_R = 48,3$ *ом* находим эквивалентное сопротивление ротора:

$$r_э = \frac{Z_R k_{oR}^2}{8w_{SA}^2 k_{oA}^2} r_R = \frac{15\cdot 0,99^2\cdot 48,3}{8\cdot 1\,344^2\cdot 0,722^2} = 0,945\cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

Подбираем медные стержни и кольца.

Диаметр стержня $d_{ст} = 5,2$ *мм*. Сечение стержня $s_{ст} = \frac{\pi d_{ст}^2}{4} = 21,2$ *мм*². Длина стержня $l_{ст} = l_R = 40$ *мм*. Сечение кольца $a\times b = 4\cdot 10 = 40$ *мм*².

Средний диаметр кольца $D_к = D - b = 50,9 - 10 = 40,9$ *мм*.

Сопротивление стержня

$$r_{ст_{75}} = \rho_{75}\frac{l_R\cdot 10^{-2}}{s_{ст}} = \frac{1}{46}\cdot\frac{4,0\cdot 10^{-2}}{21,2} = 0,41\cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

Сопротивление элемента кольца

$$r_{кол75} = \rho_{75}\frac{\pi D_к}{Z_R(a\times b)}\cdot 10^{-2} = \frac{3,14\cdot 4,09\cdot 10^{-2}}{46\cdot 15\cdot 4\cdot 10} = 0,464\cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

Выбранные размеры стержней и колец обеспечивают необходимое эквивалентное сопротивление ротора

$$r_э = r_{ст} + \frac{r_{кол}}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_R}} = 0{,}41\cdot10^{-4} + \frac{0{,}464\cdot10^{-5}}{2\sin^2\frac{180°\cdot1}{15}} = 0{,}945\cdot10^{-4}\ \textit{ом}.$$

Рассчитываем индуктивное сопротивление ротора. Берем $b_{щ\,R} = 1{,}5$ *мм* и $h_{щ\,R} = 0{,}645$ *мм*.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора при $k_\mu = 1$.

$$\lambda_{п\,R} = \left(0{,}785 - \frac{b_{щ\,R}}{2d_R}\right)k_\mu + \frac{h_{щ\,R}}{b_{щ\,R}} = \left(0{,}785 - \frac{1{,}5}{2\cdot5{,}2}\right)1 + \frac{0{,}45}{1{,}5} = 0{,}941.$$

Для определения коэффициента магнитной проводимости дифференциального рассеяния находим коэффициенты Δ_Z и ξ_R по рис. 4-7 для

$$\frac{b_{щ\,R}}{t_R} = \frac{1{,}5}{10{,}6} = 0{,}141$$

и

$$\frac{b'_{щ\,R}}{\delta} = \frac{1{,}5}{0{,}3} = 5;$$

$$\Delta_Z = 0{,}05;$$

$$\xi_R = 1 - \Delta_Z = 1 - 0{,}05 = 0{,}95.$$

Тогда коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\delta R} = \frac{t_R}{11{,}9\delta k_\delta}\xi_R = \frac{10{,}6}{11{,}9\cdot0{,}3\cdot1{,}17}\cdot0{,}95 = 2{,}45.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{л\,R} = \frac{2{,}9D_к}{Z_R\,l\left(2\sin\frac{\pi p}{Z_R}\right)^2}\lg\frac{4{,}7D_к}{2(a+b)} = \frac{2{,}9\cdot40{,}9}{15\cdot40\left(2\sin\frac{180°\cdot1}{15}\right)^2}\lg\frac{4{,}7\cdot40{,}9}{2(4+10)} = 0{,}95.$$

Суммарный коэффициент магнитной проводимости

$$\Sigma\lambda_R = \lambda_{п\,R} + \lambda_{л\,R} + \lambda_{\delta R} = 0{,}941 + 2{,}4 + 0{,}95 = 4{,}29;$$

$$\Sigma\lambda'_R = \Sigma\lambda_R\frac{l_R Z_S}{l_S Z_R}\left(\frac{k_{0\,4}}{k_{0R}}\right)^2 = 4{,}29\cdot\frac{4\cdot18}{3{,}8\cdot15}\cdot\left(\frac{0{,}722}{0{,}99}\right)^2 = 2{,}88.$$

Приведенное индуктивное сопротивление ротора

$$x_R = x_S \frac{\Sigma\lambda'_R}{\Sigma\lambda_S} = 38,8 \cdot \frac{2,88}{4,31} = 26 \quad ом.$$

Намагничивающий ток

Намагничивающий ток определяется в результате расчета магнитной цепи. На рис. 13-3 показан лист статора и ротора.

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 1,6 k_\delta B_\delta \delta = 1,6 \cdot 1,17 \cdot 4\,000 \cdot 0,03 = 225 \ a.$$

Листы статора и ротора изготовляются из стали Э12 толщиной 0,5*мм*. Листы изолированы лаком. Для нахождения магнитных напряжений остальных участков магнитной цепи пользуемся таблицей $H = f(B)$ (см. приложение 1).

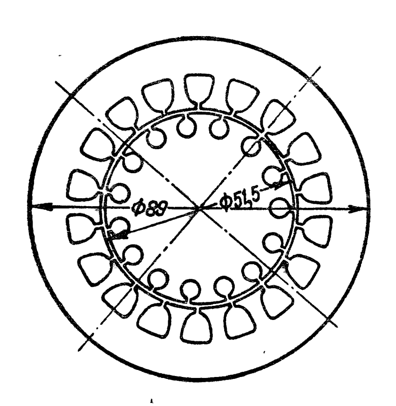


Рис. 13-3. Листы статора и ротора.

Индукция в зубцах статора при $k_c = 0,93$

$$B_{ZS} = B_\delta \frac{t_S}{b_{ZS} k_c} = 4\,000 \cdot \frac{9}{3,3 \cdot 0,93} = 11\,750 \quad гс.$$

Магнитное напряжение зубцов статора

$$F_{ZS} = H_{ZS} \cdot 2h_{ZS} = 7,9 \cdot 2 \cdot 0,85 = 13,4 \quad a.$$

Индукция в ярме статора

$$B_{a\,S} = \frac{\Phi}{2h_{a\,S} l k_c} = \frac{0,82 \cdot 10^5}{2 \cdot 1,025 \cdot 3,8 \cdot 0,93} = 11\,300 \ гс.$$

По рис. 5-1 коэффициент $\xi = 0,5$.

Магнитное напряжение ярма статора

$$F_{a\,S} = \xi H_{a\,S} \frac{\pi (D_a - h_{a\,S})}{2p} = 0,5 \cdot 7,01 \frac{3,14 (8,9 - 1,025)}{2} = 43,3 \ a.$$

Индукция в зубцах ротора

$$B_{ZR}=B_\delta \frac{t_R}{b_{Z\,R}k_c}=4\,000\;\frac{10,6}{4,87\cdot 0,93}=9\,360\ гс.$$

Магнитное напряжение зубцов ротора

$$F_{ZR}=H_{ZR}\,2h_{ZR}=4,32\cdot 2\cdot 0,518=4,48\ a.$$

Индукция в ярме ротора

$$B_{a\,R}=\frac{\Phi}{2h_{a\,R}lk_c}=\frac{0,82\cdot 10^5}{2\cdot 1,36\cdot 4\cdot 0,93}=8\,080\ гс$$

По рис. 5-1 $\xi=0,6$.
Магнитное напряжение ярма ротора при $d_в=1,62$ *см*

$$F_{a\,R}=\xi H_{a\,R}\frac{\pi\,(d_в+h_{a\,R})}{2p}=0,6\cdot 3,2\cdot\frac{3,14\,(1,62+1,36)}{2}=9\ a.$$

Суммарная н. с.

$$F_{цепи}=F_\delta+F_{ZS}+F_{ZR}+F_{a\,S}+F_{a\,R}=225+13,4+4,48+$$
$$+43,3+9=295,2\ a$$

Намагничивающий ток

$$I_{\mu\,I}=\frac{F_{цепи}\,p}{1,8w_{SA}k_{о\cdot A}}=\frac{295,2\cdot 1}{1,8\cdot 1\,344\cdot 0,722}=0,169\ a.$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{o\,r}\approx 2I_{\mu I}=2\cdot 0,169=0,338\approx 0,34\ a.$$

Реактивная составляющая тока холостого хода в процентах от номинального тока

$$\frac{I_{o\,r}}{I_н}\cdot 100=\frac{0,34}{0,455}\cdot 100=75\%.$$

Коэффициент насыщения

$$k_Z=\frac{F_\delta+F_{ZS}+F_{ZR}}{F_\delta}=\frac{225+13,4+4,48}{225}=1,08$$

мало отличается от предварительно выбранного $k_Z=1,1$.

Индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре,

$$x_{mA}=\frac{E}{I_{\mu I}}=\frac{k_E U_н}{I_{\mu I}}=\frac{0,8\cdot 220}{0,169}=1\,040\ ом.$$

В результате расчета сопротивлений статора и ротора, а также магнитной цепи определяются параметры схемы замещения главной фазы (рис. 13-4):

$$r_{SA}=102,5\ ом;\quad r_{RA}=48,3\ ом;$$
$$x_{SA}=38,8\ ом;\quad x_{RA}=26\ ом;$$
$$x_{mA}=1\,040\ ом.$$

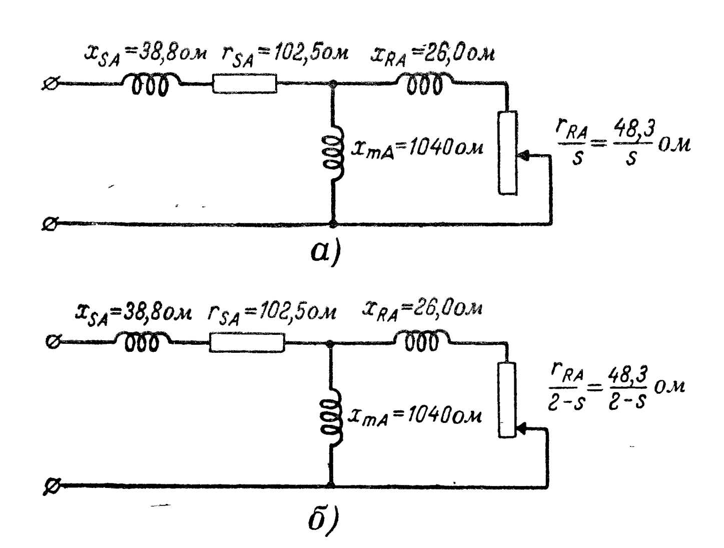


Рис. 13-4. Схемы замещения главной фазы однофазного двигателя $P_н = 30$ *вт*; $U_н = 220$ *в*; $n_с = 3\,000$ *об/мин.*

а — для токов прямой последовательности; *б* — для токов обратной последовательности.

Схема включения однофазного двигателя с пусковым сопротивлением изображена на рис. 8-1,*б*.

Расчет вспомогательной обмотки

Выполняем вспомогательную (пусковую) обмотку с повышенным активным сопротивлением (без бифиляра).

Обмоточный коэффициент вспомогательной обмотки при

$$Q_B = \frac{\frac{1}{3}Z_S}{2p} = \frac{\frac{1}{3}\cdot 18}{2} = 3:$$

$$k_{оB} = k_р k_у = \frac{\sin\frac{\pi p Q_B}{Z_S}}{Q_B \sin\frac{\pi p}{Z_S}} \sin\left(\beta\frac{\pi}{2}\right) = \frac{\sin\frac{\pi\cdot 3}{18}}{3\sin\frac{\pi}{18}} \sin\left(\frac{2}{3}\cdot\frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= 0{,}965\cdot 0{,}866 = 0{,}833.$$

Для выбора оптимального коэффициента трансформации производим расчет пусковых характеристик для $k = 0{,}4$; 0,5; 0,6 и 0,7 из условия получения максимального пускового момента. Результаты рас-

чета приведены в табл. 13-2. Для расчета кратностей пускового момента и пускового тока требуются значения номинального момента и тока, которые берутся из расчета рабочих характеристик (табл. 13-3)

Таблица 13-2

Варианты расчета

k	0,4	0,5	0,6	0,7
$M_к$, *кГ·см*	1,105	0,93	0,727	0,639
$I_к$, *а*	4,75	3,51	2,84	2,47
$m_к$, *д/е*	1,1	0,93	0,73	0,64
$i_к$, *д/е*	11,3	8,36	6,76	5,88

На основании табл. 13-2 по кратности пускового момента

$$m_к = \frac{M_к}{M_н} = \frac{930}{1\,000} = 0{,}93$$ и кратности пускового тока

$$i_к = \frac{I_к}{I_н} = \frac{3{,}53}{0{,}42} = 8{,}4$$

выбираем вариант с коэффициентом трансформации $k = 0{,}5$.

Число витков вспомогательной обмотки

$$w_{SB} = kw_{SA}\frac{k_{о\,A}}{k_{о\,B}} = 0{,}5 \cdot 1\,344\,\frac{0{,}722}{0{,}833} = 584$$

Число проводников в пазу

$$u_{п\,B} = \frac{w_{SB}a}{pQ_B} = \frac{584 \cdot 1}{1 \cdot 3} = 194{,}7.$$

Берем $u_{п\,B} = 194$; тогда число витков вспомогательной обмотки $w_{SB} = 582$. Коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_{SB}}{w_{SA}} \cdot \frac{k_{о\,B}}{k_{о\,A}} = \frac{582}{1\,344} \cdot \frac{0{,}833}{0{,}722} = 0{,}498.$$

Параметры схемы замещения главной фазы при пуске:

$$\alpha = \frac{r_{RA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{48{,}3}{1\,040 + 26} = 0{,}0453;$$

$$\beta = \frac{x_{mA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{1\,040}{1\,040 + 26} = 0{,}975;$$

$$r'_{RA\text{к}} = \frac{\alpha\beta x_{mA} s}{\alpha^2 + s^2} = \frac{0{,}0453 \cdot 0{,}975 \cdot 1\,040 \cdot 1}{0{,}0453^2 + 1} = 45{,}9 \text{ ом};$$

$$x'_{RA\text{к}} = \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}} \alpha + s^2}{\alpha^2 + s^2} = 0{,}975 \cdot 26 \frac{\frac{48{,}3}{26} \cdot 0{,}0453 + 1}{0{,}0453^2 + 1} = 27{,}5 \text{ ом};$$

$$r_{A\text{к}} = r_{SA} + r'_{RA\text{к}} = 102{,}5 + 45{,}9 = 148{,}4 \text{ ом};$$

$$x_{A\text{к}} = x_{SA} + x'_{RA\text{к}} = 38{,}8 + 27{,}5 = 66{,}3 \text{ ом}.$$

Индуктивное сопротивление схемы замещения вспомогательной фазы при пуске при принятом распределении пазов между фазами

$$\frac{Q_A}{Q_B} = a = \frac{12}{6} = 2$$

равно:

$$x_{B\text{ к}} = x_{SB} + x'_{RBk} = k^2 a \left(\frac{k_{\text{о }A}}{k_{\text{о }B}}\right)^2 x_{SA} + k^2 x'_{RAk} =$$

$$= 0{,}498^2 \cdot 2 \left(\frac{0{,}722}{0{,}833}\right)^2 \cdot 38{,}8 + 0{,}498^2 \cdot 27{,}5 = 21{,}2 \text{ ом}.$$

Активное сопротивление схемы замещения вспомогательной фазы по условию получения максимального момента при пуске

$$r'_{Bkm} = \frac{x_{B\text{к}}}{x_{A\text{ к}}} \left(r_{A\text{ к}} + \sqrt{r^2_{A\text{к}} + x^2_{A\text{ к}}}\right) =$$

$$= \frac{21{,}2}{66{,}3} \left(148{,}4 + \sqrt{148{,}4^2 + 66{,}3^2}\right) = 99{,}5 \text{ ом}.$$

Рассчитываем коэффициент

$$A = \frac{97{,}4}{n_\text{с}} \frac{r'_{RA\text{к}} U^2_\text{н} k}{r^2_{A\text{ к}} + x^2_{A\text{ к}}} = \frac{97{,}4}{3\,000} \frac{45{,}9 \cdot 220^2 \cdot 0{,}498}{148{,}4^2 + 66{,}3^2} = 1{,}35.$$

Определяем пусковой момент

$$M_{\text{к макс}} = A \frac{\sqrt{r^2_{A\text{ к}} + x^2_{A\text{ к}}} - r_{A\text{ к}}}{x_{B\text{ к}}} =$$

$$= 1{,}35 \frac{163{,}0 - 148{,}4}{21{,}2} = 0{,}93 \text{ кГ} \cdot \text{см} = 930 \text{ Г} \cdot \text{см}.$$

Пусковой ток в главной фазе

$$I_{A\text{ к}} = \frac{U_\text{н}}{\sqrt{r^2_{A\text{ к}} + x^2_{A\text{ к}}}} = \frac{220}{\sqrt{148{,}4^2 + 66{,}3^2}} = 1{,}36 \text{ а}.$$

Коэффициент мощности в главной фазе

$$\cos\varphi_{A\,к} = \frac{r_{A\,к}}{\sqrt{r_{A\,к}^2 + x_{A\,к}^2}} = \frac{148,4}{\sqrt{148,4^2 + 66,3^2}} = 0,91.$$

Плотность тока в главной обмотке

$$\Delta_{A\,к} = \frac{I_{A\,к}}{S_A} = \frac{1,36}{0,0755} = 18\ а/мм^2.$$

Линейный пусковой ток $I_к$, потребляемый из сети двигателем, равен:

$$I_к = I_{A\,к}\sqrt{\frac{(r_{A\,к} + r'_{Bкm})^2 + (x_{A\,к} + x_{B\,к})^2}{(r'_{Bкm})^2 + x_{B\,к}^2}} =$$

$$= 1,36\sqrt{\frac{(148,4 + 99,5)^2 + (66,3 + 21,2)^2}{99,5^2 + 21,2^2}} = 3,51\ а.$$

Кратность пускового тока

$$i_к = \frac{I_к}{I_н} = \frac{3,51}{0,42} = 8,36$$

(номинальный ток $I_н$ берем из расчета рабочих характеристик).

Активное сопротивление вспомогательной обмотки

$$r_{SB} = r_{B\,к} = r'_{Bкm} - k^2 r'_{RA\,к} = 99,5 - 0,493^2 \cdot 45,9 = 88,1\ ом.$$

Длина провода обмотки

$$L_{SB} = L_{SA}\frac{w_{SB}}{w_{SA}} = 356 \cdot \frac{582}{1\,344} = 154,2\ м.$$

Сечение провода

$$S'_{SB} = \frac{1}{46}\frac{L_{SB}}{r_{SB}} = \frac{1}{46} \cdot \frac{154,2}{88,1} = 0,038\ мм^2.$$

Округляем до ближайшего стандартного сечения $s_{SB} = 0,0415\ мм^2$.

Выбираем провод марки ПЭВ-2: $\frac{d_{гол}}{d_{из}} = \frac{0,23}{0,28}$.

Отношение

$$t = \frac{S_A}{S_B} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{k_{о\,B}}{k_{о\,A}} = \frac{0,0755}{0,0415} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{0,833}{0,722} = 1,05.$$

Коэффициент заполнения паза вспомогательной обмоткой

$$k_{зап} = \frac{d_{из}^2 u_п}{S_{пS} - S_{из}} = \frac{0,28^2 \cdot 194}{55,1 - 9} = 0,33.$$

Фактическое активное сопротивление вспомогательной обмотки

$$r_{SB} = r_{B\,к} \frac{S'_{SB}}{S_{SB}} = 88,1 \frac{0,038}{0,0415} = 80,7 \text{ ом}.$$

Фактическое активное сопротивление вспомогательной фазы при пуске

$$r'_{B\,к} = r_{SB} + k^2 r'_{RA\,к} = 80,7 + 0,498^2 \cdot 45,9 = 92,09 \text{ ом}.$$

Ток во вспомогательной фазе

$$I_{B\,к} = \frac{U_н}{\sqrt{(r'_{B\,к})^2 + (x_{B\,к})^2}} = \frac{220}{\sqrt{92 \cdot 09^2 + 21,2^2}} = 2,34 \text{ а}.$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы

$$\cos\varphi_{B\,к} = \frac{r'_{B\,к}}{\sqrt{(r'_{B\,к})^2 + (x_{B\,к})^2}} = \frac{92,09}{\sqrt{92,09^2 + 21,2^2}} = 0,98.$$

Плотность тока во вспомогательной обмотке

$$\Delta_{B\,к} = \frac{I_{B\,к}}{S_B} = \frac{2,34}{0,0415} = 56,4 \text{ а/мм}^2.$$



Рис. 13-5. Совмещенная векторная диаграмма токов однофазного двигателя с пусковым сопротивлением (в номинальном и пусковом режимах).

Соотношение токов в главной и вспомогательной фазах при пуске и угол сдвига между токами $I_{A\,к}$ и $I_{B\,к}$ иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 13-5. На диаграмме показан также номинальный ток главной фазы.

На рис. 13-6 приводится круговая диаграмма пускового тока, построенная для выбранного коэффициента трансформации при $x_{B\,к} = 21{,}2$ *ом*. Диаметр круговой диаграммы

$$D = \frac{U_н}{x_{B\,к}} = \frac{220}{21{,}2} = 10{,}4 \ a.$$

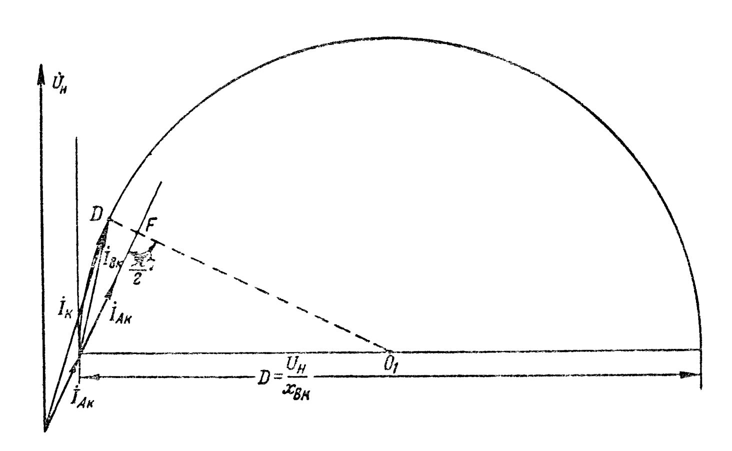


Рис. 13-6. Круговая диаграмма пусковых токов однофазного двигателя с пусковым сопротивлением.

Активное сопротивление вспомогательной фазы, найденное по круговой диаграмме из условия максимального пускового момента (точка D круговой диаграммы),

$$r'_{B\,к} = \sqrt{\left(\frac{U_н}{I_{B\,к}}\right)^2 - x^2_{B\,к}} = \sqrt{\left(\frac{220}{2{,}3}\right)^2 - 21{,}2^2} = 93 \ ом$$

практически совпадает с величиной этого сопротивления, найденной аналитическим путем.

Расчетные потери в стали

Пакет статора и ротора выполнен из стали Э12; толщина листов 0,5 *мм*; листы изолированы лаком.

Вес ярма статора

$$G_{a\,S} = 7{,}8\pi\,(D_a - h_{aS})\,h_{aS}\,k_c \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7{,}8 \cdot 3{,}14\,(8{,}9 - 1{,}025) \cdot 1{,}025 \cdot 3{,}8 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3} = 0{,}696 \ кг.$$

Расчетные потери в ярме статора

$$P'_{caS} = 1{,}6 p_{10/50} \left(\frac{B_{aS}}{10^4}\right)^2 G_{aS} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} =$$

$$= 1{,}6 \cdot 3{,}3 \left(\frac{11\,300}{10^4}\right)^2 \cdot 0{,}696 = 4{,}71 \text{ вт.}$$

Вес ярма ротора

$$G_{aR} = 7{,}8\pi (d_в + h_{aR}) h_{aR} l_R k_с \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7{,}8 \cdot 3{,}14 (1{,}62 + 1{,}36) \cdot 1{,}36 \cdot 4 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3} = 0{,}368 \text{ кг.}$$

Расчетные потери в ярме ротора

$$P'_{caR} = 1{,}6 p_{10/50} \left(\frac{B_{aR}}{10^4}\right)^2 G_{aR} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} = 1{,}6 \cdot 3{,}3 \left(\frac{8\,080}{10^4}\right)^2 \cdot 0{,}368 \cdot 1 = 1{,}27 \text{ вт,}$$

Вес зубцов статора

$$G_{ZS} = 7{,}8 Z_S b_{ZS} h_{ZS} l_S k_с \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7{,}8 \cdot 18 \cdot 0{,}33 \cdot 0{,}85 \cdot 3{,}8 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3} = 0{,}139 \text{ кг.}$$

По табл. 6-2 для листов, изолированных лаком и неотожженных, обработка статора — шлифовка; коэффициент $k_т = 1$.

Расчетные потери в зубцах статора

$$P'_{cZS} = 1{,}8 p_{10/50} \left(\frac{B_{ZS}}{10^4}\right)^2 G_{ZS} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} k_т =$$

$$= 1{,}8 \cdot 3{,}3 \left(\frac{11\,750}{10^4}\right)^2 \cdot 0{,}139 \cdot 1 \cdot 1 = 1{,}14 \text{ вт.}$$

Вес зубцов ротора

$$G_{ZR} = 7{,}8 Z_R b_{ZR} h_{ZR} l_R k_с \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7{,}8 \cdot 15 \cdot 0{,}487 \cdot 0{,}518 \cdot 4 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3} = 0{,}11 \text{ кг.}$$

Расчетные потери в зубцах ротора

$$P'_{cZR} = 1{,}8 p_{10/50} \left(\frac{B_{ZR}}{10^4}\right)^2 G_{ZR} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} k_т =$$

$$= 1{,}8 \cdot 3{,}3 \left(\frac{9\,360}{10^4}\right)^2 \cdot 0{,}11 \cdot 1 \cdot 1 = 0{,}57 \text{ вт.}$$

Суммарные расчетные потери в стали статора

$$P'_{cS} = P'_{caS} + P'_{cZS} = 4{,}71 + 1{,}14 = 5{,}85 \text{ вт.}$$

Суммарные расчетные потери в стали ротора

$$P'_{cR} = P'_{caR} + P'_{cZR} = 1{,}27 + 0{,}57 = 1{,}84 \text{ вт.}$$

Расчет характеристик двигателя

Рабочие характеристики, номинальные величины, перегрузочная способность

Рабочие характеристики и перегрузочная способность рассчитываются при питании только главной обмотки, т. е. при пульсирующем поле в зоне скольжений от $s = s_0$ до $s = s_m$.

Параметры схемы замещения при $s=0{,}03$;
Сопротивления разветвления главной фазы

$$r'_{RA1}=\frac{\alpha\beta x_{mA}s}{\alpha^2+s^2}=\frac{0{,}0453\cdot 0{,}975\cdot 1\,040s}{0{,}0453^2+s^2}=\frac{45{,}9s}{0{,}002+s^2}=$$
$$=\frac{45{,}9\cdot 0{,}03}{0{,}002+0{,}03^2}=474\ \text{ом};$$

$$r'_{RA2}=\frac{\alpha\beta x_{mA}(2-s)}{\alpha^2+(2-s)^2}=\frac{45{,}9(2-s)}{0{,}002+(2-s)^2}=$$
$$=\frac{45{,}9\cdot 1{,}97}{0{,}002+1{,}97^2}=23{,}3\ \text{ом};$$

$$x'_{RA1}=\beta x_{RA}\frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}}\alpha+s^2}{\alpha^2+s^2}=0{,}975\cdot 26\,\frac{\frac{48{,}3}{26}\alpha+s^2}{0{,}0453^2+s^2}=$$
$$=0{,}975\cdot 26\cdot\frac{0{,}084+0{,}03^2}{0{,}002+0{,}03^2}=740\ \text{ом};$$

$$x'_{RA2}=\beta x_{RA}\frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}}\alpha+(2-s)^2}{\alpha^2+(2-s)^2}=0{,}975\cdot 26\cdot\frac{\frac{48{,}3}{26}\alpha+(2-s)^2}{0{,}0453^2+(2-s)^2}=$$
$$=25{,}4\cdot\frac{0{,}084+1{,}97^2}{0{,}002+1{,}97^2}=26\ \text{ом};$$

$$Z'_{RA1}=r'_{RA1}+jx'_{RA1}=474+j740=880\,e^{j57^\circ 30'}\ \text{ом};$$
$$Z'_{RA2}=r'_{RA2}+jx'_{RA2}=23{,}3+j26=34{,}8\,e^{j48^\circ 48'}\ \text{ом}.$$

Приведенное сопротивление ротора

$$Z_{RA1}=\frac{r_{RA}}{s}+jx_{RA}=\frac{48{,}3}{0{,}03}+j26=1610+$$
$$+j26=1\,610\,e^{j51'}\ \text{ом};$$
$$Z_{RA2}=\frac{r_{RA}}{2-s}+jx_{RA}=\frac{48{,}3}{2-0{,}03}+j26=$$
$$=24{,}5+j26=35{,}7e^{57^\circ 36'}\ \text{ом}.$$

Полные сопротивления схемы замещения прямой и обратной последовательностей главной фазы

$$Z_{A1}=(r_{SA}+r'_{RA1})+j(x_{SA}+x'_{RA1})=$$
$$=(102{,}5+474)+j(38{,}8+740)=576{,}5+j778{,}8\ \text{ом};$$
$$Z_{A2}=(r_{SA}+r'_{RA2})+j(x_{SA}+x'_{RA2})=102{,}5+23{,}3+$$
$$+j(38{,}8+26)=125{,}8+j64{,}8\ \text{ом};$$
$$Z_{A1}+Z_{A2}=576{,}5+j778{,}8+125{,}8+j64{,}8=$$
$$=702{,}3+j845{,}6\ \text{ом}.$$

Составляющие тока статора прямой и обратной последовательностей главной фазы

$$\dot I_{A1} = \dot I_{A2} = \frac{\dot U_{н}}{Z_{A1}+Z_{A2}} = \frac{220}{702{,}3+j845{,}6} = 0{,}2e^{-j50°6'};$$

$$I_{A1} = 0{,}2 \ a; \ 2I_{A1} = 2\cdot 0{,}2 = 0{,}4 \ a.$$

Ток статора главной фазы без учета потерь в стали

$$\dot I_{A} = 2\dot I_{A1} = I'_{A} + jI''_{A} = 0{,}257 - j0{,}308.$$

Потери в стали статора от поля прямой последовательности при значении э. д. с. прямой последовательности

$$E_1 = I_{A1} z'_{RA1} = 0{,}2\cdot 877 = 176 \ в.$$

$$P_{cS1} = P'_{cS}\left(\frac{E_1}{U_{н}k_E}\right)^2 = 5{,}85\left(\frac{176}{220\cdot 0{,}8}\right)^2 = 5{,}85 \ вт.$$

Потери в стали статора от поля обратной последовательности при значении э. д. с. обратной последовательности

$$E_2 = I_{A2} z'_{RA2} = 0{,}2\cdot 34{,}9 = 6{,}98 \ в$$

$$P_{cS2} = P'_{cS}\left(\frac{E_2}{U_{н}k_E}\right)^2 = 5{,}85\left(\frac{6{,}98}{220\cdot 0{,}8}\right)^2 = 0{,}0092 \ вт.$$

Потери в стали ротора от поля прямой последовательности при скольжении $s = 0{,}03$

$$P_{cR1} = P'_{cR}\left(\frac{E_1}{U_{н}k_E}\right)^2 s^{1,3} = 1{,}89\left(\frac{176}{220\cdot 0{,}8}\right)^2 \cdot 0{,}03^{1,3} = 0{,}02 \ вт.$$

Потери в стали ротора от поля обратной последовательности при скольжении $s = 0{,}03$

$$P_{cR2} = P'_{cR}\left(\frac{E_2}{U_{н}k_E}\right)^2 (2-s)^{1,3} = 1{,}89\left(\frac{6{,}98}{220\cdot 0{,}8}\right)^2 \times$$

$$\times (2-0{,}03)^{1,3} = 0{,}0072 \ вт.$$

Добавочный ток главной фазы прямой последовательности от потерь в стали

$$I'_{A1c} = \frac{P_{cS1}+P_{cR1}}{E_1} = \frac{5{,}85+0{,}02}{176} = 0{,}0334 \ a.$$

Добавочный ток главной фазы обратной последовательности от потерь в стали

$$I'_{A2c} = \frac{P_{cS2}+P_{cR2}}{E_2} = \frac{0{,}0092+0{,}0072}{6{,}98} = 0{,}0024 \ a.$$

Ток в главной обмотке статора с учетом потерь в стали

$$\dot I_{SA} = (I'_{A} + I'_{A1c} + I'_{A2c}) + jI''_{A} = I'_{SA} + jI''_{SA} =$$

$$= (0{,}257 + 0{,}0334 + 0{,}0024) + j0{,}308 = 0{,}293 + j0{,}308 = 0{,}425e^{-j46°20'}.$$

Плотность тока в главной обмотке статора

$$\Delta_A = \frac{I_{SA}}{S_{SA}} = \frac{0,425}{0,0755} = 5,63 \ a/мм^2.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi_A = \frac{I'_{SA}}{I_{SA}} = \frac{0,293}{0,425} = 0,69.$$

Действительный ток в роторе прямой последовательности

$$I''_{RA1} = I_A \frac{2w_{SA}k_{0A}}{Z_R k_{0R}} \frac{z'_{RA1}}{z_{RA1}} = 0,4 \frac{2\cdot 1\,344\cdot 0,722}{15\cdot 0,99}\cdot\frac{877}{1\,610} = 28,5 \ a$$

Действительный ток в роторе обратной последовательности

$$I''_{RA2} = I_A \frac{2w_{SA}k_{0A}\, z'_{RA2}}{Z_R k_{0R}\, z_{RA2}} = 0,4\cdot\frac{2\cdot 1\,344\cdot 0,722}{15\cdot 0,99}\cdot\frac{34,9}{35,7} = 51,1 \ a.$$

Действительный ток в роторе

$$I''_{RA} = \sqrt{(I''_{RA1})^2 + (I''_{RA2})^2} = \sqrt{28,5^2 + 51,1^2} = 58,5 \ a.$$

Плотность тока в стержне ротора

$$\Delta_{ст} = \frac{I''_{RA}}{S_с} = \frac{58,5}{21,2} = 2,77 \ a/мм^2.$$

Электромагнитная мощность

$$P_э = \frac{1}{2} I_A^2 (r'_{RA1} - r'_{RA2}) = \frac{1}{2}\, 0,4^2 (474 - 23,3) = 36,6 \ вт.$$

Электромагнитный момент

$$M_э = \frac{97,4\cdot 10^3}{n_с} P_э = \frac{97,4\cdot 10^3}{3\,000}\cdot 36,6 = 1\,190 \ Г\cdot см.$$

Принимаем механические потери $P_{мех} = 3$ *вт*.

Электрические потери в главной обмотке статора

$$P_{мS} = I_{SA}^2 r_{SA} = 0,425^2\cdot 102,5 = 18,5 \ вт.$$

Электрические потери в роторе

$$P_{мR} = \frac{1}{2} I_{SA}^2 [r'_{RA1}s + r'_{RA2}(2-s)] = \frac{1}{2}\cdot 0,425^2 (474\cdot 0,03 + + 23,3\cdot 1,97) = 5,44 \ вт.$$

Для определения добавочных потерь рассчитываем к. п. д без учета этих потерь. Впоследствии он уточняется.

Добавочные потери

$$P_{доб} = 0,005 \frac{P_н}{\eta} = 0,005 \frac{30}{0,492} = 0,31 \ вт.$$

Полная механическая мощность

$$P'_R = P_э (1 - s) = 36,6 (1 - 0,03) = 35,5 \ вт.$$

Полезная мощность

$$P_R = P'_R - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}} = 35{,}5 - 3 - 0{,}31 = 32{,}2 \ \textit{вт}.$$

Полные потери в стали

$$P_{\text{с}} = P_{\text{с}S1} + P_{\text{с}S2} + P_{\text{с}R1} + P_{\text{с}R2} = 5{,}85 + 0{,}0092 + 0{,}02 + 0{,}0072 = 5{,}89 \ \textit{вт}.$$

Подводимая мощность

$$P_S = P'_R + P_{\text{м}S} + P_{\text{м}R} + P_{\text{с}} = 35{,}5 + 18{,}5 + 5{,}44 + 5{,}89 = 65{,}33 \ \textit{вт}.$$

Суммарные потери

$$\Sigma P = P_{\text{с}} + P_{\text{м}S} + P_{\text{м}R} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}} = 5{,}89 + 18{,}5 + 5{,}44 + 3 + 0{,}31 = 33{,}14 \ \textit{вт}.$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_S} = 1 - \frac{33{,}14}{65{,}33} = 0{,}492.$$

Результаты расчета рабочих характеристик при включении одной обмотки (пульсирующее поле) для скольжений от s_0 до s_m сведены в табл. 13-3.

Зависимости n, I_{sA}, $\cos\varphi$, $\eta = f(P_R)$ даны на рис. 13-7; на рис. 13-8 приведена кривая $M = f(s)$ (кривая *1*).

Максимальный момент $M_{\text{макс}} = 2\,490$ *Г·см*. Тогда кратность максимального момента

$$m_m = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = \frac{2\,490}{1\,000} = 2{,}49.$$

„Максимальное" скольжение $s_m = 0{,}19$.

Скольжение холостого хода определяется по методу, изложенному в § 9-2.

Определяем параметры схемы замещения при синхронном холостом ходе ($s = 0$):

$$r'_{RA1} = 0; \ x'_{RA1} = x_{mA} = 1\,040 \ \textit{ом};$$

$$r'_{RA2} = \frac{x_{mA}^2 \frac{r_{RA}}{2}}{\left(\frac{r_{RA}}{2}\right)^2 + (x_{mA} + x_{RA})^2} = \frac{1\,040^2 \cdot \frac{48{,}3}{2}}{\left(\frac{48{,}3}{2}\right)^2 + (1\,040 + 26)^2} = 22{,}9 \ \textit{ом};$$

$$x'_{RA2} = \frac{x_{mA}\left(\frac{r_{RA}}{2}\right) + x_{mA}x_{RA}(x_{mA} + x_{RA})}{\left(\frac{r_{RA}}{2}\right)^2 + (x_{mA} + x_{RA})^2} =$$

$$= \frac{1\,040\left(\frac{48{,}3}{2}\right) + 1\,040 \cdot 26\,(1\,040 + 26)}{\left(\frac{48{,}3}{2}\right)^2 + (1\,040 + 26)^2} = 25{,}3 \ \textit{ом}.$$

Рис. 13-7. Рабочие характеристики двигателя $P_н = 30$ *вт*, $n_н = 2\,920$ *об/мин*.

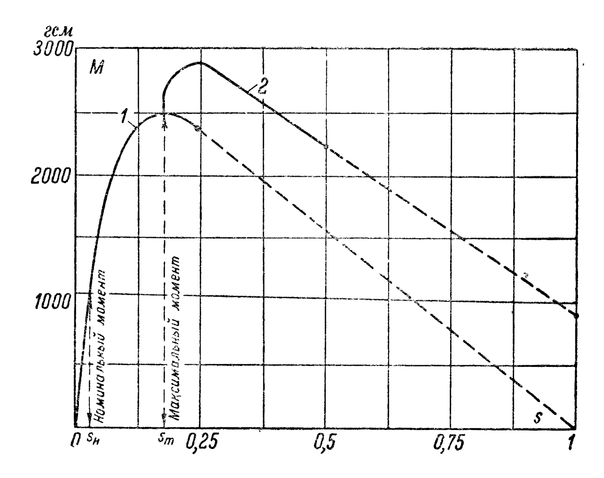


Рис. 13-8. Зависимость вращающего момента от скольжения однофазного двигателя с пусковым сопротивлением $P_н = 30$ *вт*.

Таблица 13-3

Расчет рабочих характеристик

Величина	Размерность	Скольжение s			
		0,0033	0,01	0,02	0,03
r'_{RA1}	*ом*	75,6	218,5	383	474
x'_{RA1}	„	1 070	1 020	894	740
r'_{RA2}	„	23	23,1	23,2	23,3
x'_{RA2}	„	26,0	26,0	26,0	26,0
Z_{A1}	„	$185,1+j1108,8$	$321+j1058,8$	$485,5+j931,8$	$576,5+j778,8$
Z_{A2}	„	$125,5+j64,8$	$125,6+j64,80$	$125,3+j64,8$	$125,8+j64,8$
I_A	*а*	0,364	0,366	0,38	0,402
$P_э$	*вт*	3,49	13,1	26	36,6
$M_э$	*Г·см*	113,2	425	845	1 190
P'_R	*вт*	3,47	13,0	25,5	35,5
P_R	„	0	9,6	22,2	32,2
n	*об/мин*	2 991	2 970	2 940	2 910
M	*Г·см*	0	315	735	1 078
P_{c1}	*вт*	7,25	6,96	6,44	5,87
P_{c2}	„	0,0098	0,011	0,0120	0,016
I_{SA}	*а*	0,376	0,38	0,4	0,425
P_{MS}	*вт*	14,5	15,0	16,4	18,5
P_{MR}	„	3,27	3,52	4,23	5,44
ΣP	„	28,43	28,89	30,4	33,14
P_S	„	28,43	38,4	52,6	65,33
η	—	0	0,25	0,42	0,492
$\cos\varphi$	—	0,354	0,46	0,59	0,68

Величина	Размерность	Скольжение, *s*				
		0,04	0,09	0,14	0,19	0,24
r'_{RA1}	*ом*	510	409	299,5	229,5	185
x'_{RA1}	,	605	213	122,5	80,9	61,1
r'_{RA2}	„	23,4	24	24,65	25,4	26
x'_{RA2}	„	26,0	26,1	26,1	26,1	26,1
Z_{A1}	„	612,5+*j*643,8	511,5+*j*251,8	402+*j*161,3	332+*j*119,7	287,5+*j*99,9
Z_{A2}	„	125,9+*j*64,8	126,5+*j*64,9	127,15+*j*64,9	127,9+*j*64,9	128,5+*j*64,9
I_A	*а*	0,432	0,622	0,764	0,89	0,99
$P_э$	*вт*	45,3	74,2	80	80,7	78
$M_э$	*Г·см*	1 470	2 410	2 600	2 620	2 530
P'_R	*вт*	43,5	67,5	68,8	65,5	59,9
P_R	„	40,2	64,2	65,5	62,2	56,0
n	*об/мин*	2 880	2 730	2 580	2 430	2 280
M	*Г·см*	1 360	2 295	2 420	2 490	2 390
P_{c1}	*вт*	5,5	3,8	2,89	2,2	1,75
P_{c2}	„	0,0180	0,0300	0,0620	0,0850	0,10
I_{SA}	*а*	0,46	0,65	0,79	0,92	1,01
P_{MS}	*вт*	21,7	43,5	64	86	105,7
P_{MR}	„	7,01	17,4	27,4	37,7	46,4
ΣP	„	37,5	68	97,6	129,2	157,2
P_S	„	77,7	132,2	163,1	191,4	213,2
η	—	0,517	—	—	—	—
$\cos\varphi$	—	0,76	—	—	—	—

Полные сопротивления схемы замещения прямой и обратной последовательностей главной фазы при $s = 0$

$$Z_{A1} = (r_{SA} + r'_{RA1}) + j(x_{SA} + x'_{RA1}) = 102,5 +$$

$$+ j(38,8 + 1\,040) = 102,5 + j1078,8 \text{ ом};$$

$$Z_{A2} = (r_{SA} + r'_{RA2}) + j(x_{SA} + x'_{RA2}) = (102,5 + 22,9) +$$

$$+ j(38,8 + 25,3) = 125,4 + j64,1 \text{ ом}.$$

Находим ток в главной фазе при $s = 0$:

$$\dot{I}_A = \frac{2U_н}{Z_{A1} + Z_{A2}} = \frac{2 \cdot 220}{227,9 + j1142,1} = 0,0734 - j0,37;$$

$$I_A = 0,377 \text{ а}.$$

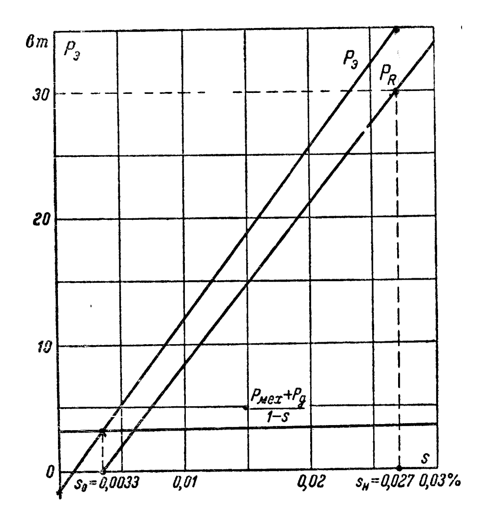


Рис. 13-9. К определению s_0 и $s_н$.

Электромагнитная мощность при $s = 0$

$$P_э = -\frac{1}{2} I_A^2 r'_{RA2} = -\frac{1}{2} \cdot 0,377^2 \cdot 22,9 = -1,625 \text{ вт}.$$

По рис. 13-9 получаем: $s_0 = 0,0033$; $n_0 = 2\,990$ *об/мин.*

На этом рисунке построена зависимость $P_R = f(s)$ для уточнения номинального скольжения. Для полезной мощности на валу $P_{Rн} =$

$= 30$ *вт*, $s_н = 0{,}027$; $n_н = 2\,920$ *об/мин*; $M_н = 1\,000$ *Г·см*. Номинальный ток по рабочей характеристике (см. рис. 13-7)

$$I_{SAн} = I_н = 0{,}42 \text{ } a; \ \cos\varphi = 0{,}67; \ \eta = 0{,}48.$$

На рис. 13-7 пунктирными линиями показаны для сравнения опытные рабочие характеристики двигателя, выпускаемого заводом „Красногвардеец" для медицинской промышленности.

Наибольшее расхождение расчетных и опытных величин имеется по току статора. Оно не превышает 5% и обусловлено главным образом неточностью формул для потерь в стали. Опытные и расчетные кривые $n = f(P_R)$ практически совпадают.

Пусковая характеристика $M = f(s)$

Пусковая характеристика рассчитывается при питании обеих обмоток, т. е. при эллиптическом поле в зоне скольжений от $s = s_m$ до $s = 1$ по параметрам, рассчитанным для номинального режима. Изменение сопротивления x_{mA}, соответствующего потоку в воздушном зазоре, при переходе от номинального режима к короткому замыканию, как показали расчеты, невелико (x_{mA} увеличивается на 7,5%), и практически не сказывается на величинах начального пускового момента и тока.

Приводим полный расчет для скольжения $s = 0{,}24$.

Параметры схемы замещения для главной фазы при $s = 0{,}24$:

Сопротивления разветвления

$$r'_{RA1} = \frac{\alpha\beta x_{mA} s}{\alpha^2 + s^2} = \frac{0{,}0453 \cdot 0{,}975 \cdot 1\,040 \cdot 0{,}24}{0{,}0453^2 + 0{,}24^2} = 185 \text{ ом};$$

$$r'_{RA2} = \frac{\alpha\beta x_{mA}(2 - s)}{\alpha^2 + (2 - s)^2} = \frac{45{,}9 \cdot 1{,}76}{0{,}0453^2 + 1{,}76^2} = 26 \text{ ом};$$

$$x'_{RA1} = \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}}\alpha + s^2}{\alpha^2 + s^2} = 0{,}975 \cdot 26 \frac{\frac{48{,}3}{26} \cdot 0{,}0453 + 0{,}24^2}{0{,}0453^2 + 0{,}24^2} = 56 \text{ ом};$$

$$x'_{RA2} = \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}}\alpha + (2 - s)^2}{\alpha^2 + (2 - s)^2} =$$

$$= 0{,}975 \cdot 26 \frac{\frac{48{,}3}{26} \cdot 0{,}0453 + 1{,}76^2}{0{,}0453^2 + 1{,}76^2} = 26 \text{ ом}.$$

Полные сопротивления схемы замещения прямой и обратной последовательностей для главной фазы

$$Z_{A1} = (r_{SA} + r'_{RA1}) + j(x_{SA} + x'_{RA1}) =$$
$$= (102{,}5 + 185) + j(38{,}8 + 56) = 287{,}5 + j94{,}8;$$
$$Z_{A2} = (r_{SA} + r'_{RA2}) + j(x_{SA} + x'_{RA2}) = (102{,}5 + 26) +$$
$$+ j(38{,}8 + 26) = 128{,}5 + j64{,}8 \text{ ом}.$$

Полные сопротивления схемы замещения прямой и обратной последовательностей вспомогательной фазы:

$$Z_{B1} = \left[kta\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 r_{SA} + k^2 r'_{RA1}\right] + j\left[k^2 a\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 x_{SA} + k^2 x'_{RA1}\right] =$$
$$= \left[0{,}5\cdot 1{,}05\cdot 2\left(\frac{0{,}722}{0{,}833}\right)^2\cdot 102{,}5 + 0{,}5^2\cdot 185\right] +$$
$$+ j\left[0{,}5^2\cdot 2\left(\frac{0{,}722}{0{,}833}\right)^2\cdot 38{,}8 + 0{,}5^2\cdot 56\right] = 127{,}2 + j28{,}54 \text{ ом};$$
$$Z_{B2} = \left[kta\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 r_{SA} + k^2 r'_{RA2}\right] + j\left[k^2 a\left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 x_{SA} + k^2 x'_{RA2}\right] =$$
$$= \left[0{,}5\cdot 1{,}05\cdot 2\left(\frac{0{,}722}{0{,}833}\right)^2\cdot 102{,}5 + 0{,}5^2\cdot 26\right] +$$
$$+ j\left[0{,}5^2\cdot 2\left(\frac{0{,}722}{0{,}833}\right)^2\cdot 38{,}8 + 0{,}5^2\cdot 26\right] = 87{,}5 + j21{,}04 \text{ ом}.$$

Ток прямой последовательности главной фазы

$$\dot I_{A1} = \dot U_{н}\frac{Z_{B2} - jkZ_{A2}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} =$$
$$= 220\frac{(87{,}5 + j21{,}04) - j0{,}5(128{,}5 + j64{,}8)}{(287{,}5 + 94{,}8)\cdot(87{,}5 + 21{,}04) + (128{,}5 + j64{,}8)\cdot(127{,}2 + j28{,}54)} =$$
$$= 0{,}354 - j0{,}502;\ I_{A1} = 0{,}615 \text{ а}.$$

Ток обратной последовательности главной фазы

$$\dot U_{A2} = \dot U_{н}\cdot\frac{Z_{B1} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} =$$
$$= 220\frac{(127{,}2 + j28{,}54) + j0{,}5(287{,}5 + j94{,}8)}{(287{,}5 + j94{,}8)\cdot(87{,}5 + j21{,}04) + (128{,}5 + j64{,}8)\cdot(127{,}2 + j28{,}54)} =$$
$$= 0{,}792 + j0{,}44;$$
$$I_{A2} = 0{,}905 \text{ а}.$$

Полный ток главной фазы без учета потерь в стали

$$\dot I_A = \dot I_{A1} + \dot I_{A2} = (0{,}354 - j0{,}502) + (0{,}792 + j0{,}44) = 1{,}146 - j0{,}062;$$
$$I_A = 1{,}146 \text{ а}.$$

Ток вспомогательной фазы без учета потерь в стали

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = j\frac{\dot{I}_{A1}}{k} - j\frac{\dot{I}_{A2}}{k} = j\frac{0,354 - j0,502}{0,5} -$$

$$- j\frac{0,792 + j0,44}{0,5} = 1,884 - j0,876;$$

$$I_B = 2,08 \ a.$$

Ток сети

$$\dot{I} = \dot{I}_A + \dot{I}_B = (1,146 - j0,062) + (1,184 - j0,876) = 3,03 - j0,938;$$

$$I = 3,17 \ a.$$

При расчете $M = f(s)$ в зоне скольжений от s_m до $s = 1$ пользуемся значением тока без учета потерь в стали

Электромагнитная мощность

$$P_э = 2I^2_{A1}r'_{RA1} - 2I^2_{A2}r'_{RA2} = 2 \cdot 0,615^2 \cdot 185 - 2 \cdot 0,905^2 \cdot 26 =$$

$$= 140 - 42,6 = 97,4 \ вт.$$

Электромагнитный момент

$$M_э = \frac{97,4 \cdot 10^3}{n_с} P_э = \frac{97,4 \cdot 10^3}{3\,000} \cdot 97,4 = 3\,160 \ Г \cdot см.$$

Полная механическая мощность

$$P'_R = P_э(1 - s) = 97,4\,(1 - 0,24) = 74 \ вт.$$

Полезная мощность

$$P_R = P'_R - P_{мех} - P_{доб} = 74 - 3 - 0,31 = 70,7 \ вт.$$

Полезный момент

$$M = \frac{97,4\, P_R \cdot 10^3}{n_с(1 - s)} = \frac{97,4 \cdot 70,7 \cdot 10^3}{3\,000\,(1 - 0,24)} = 3\,020 \ Г \cdot см.$$

Результаты расчета пусковой характеристики $M = f(s)$ при эллиптическом поле для скольжений $s = 0,19 \div 1$ приведены в табл. 13-4 и на рис. 13-8.

Кратность начального пускового момента при $s = 1$

$$m_к = \frac{M_к}{M_н} = \frac{930}{1\,000} = 0,93.$$

Кратность пускового тока

$$i_к = \frac{I_к}{I_н} = \frac{3,51}{0,42} = 8,36.$$

На рис. 13-10 представлен общий вид спроектированного однофазного асинхронного двигателя $P_н = 30\,вт$, $n_н = 2\,920$ *об/мин* с повышенным активным сопротивлением в пусковой фазе.

Таблица 13-4

Расчет пусковых характеристик

Величина	Размерность	0,19	0,24	0,29	0,5	1
r'_{RA1}	*ом*	229,5	185	154,8	91	45,0
r'_{RA2}	»	25,4	26	26,9	30,6	45,9
x'_{RA1}	»	75,9	56	48,0	32	27,5
x'_{RA2}	»	25,9	26	26,2	26,6	27,5
Z_{A1}	»	332+*j*113,8	287,5+*j*94,8	257,4+*j*86,8	193,5+*j*70,8	148,3+*j*66,3
Z_{A2}	»	127,9+*j*64,7	128,5+*j*64,8	129,5+*j*65	133,1+*j*65,4	148,3+*j*66,3
Z_{B1}	»	138,4+*j*34	127,2+*j*28,54	119,7+*j*27	103,4+*j*22,8	92,45+*j*21,23
Z_{B2}	»	87,35+*j*21,02	87,5+*j*21,04	87,73+*j*21,06	88,65+*j*21,12	92,45+*j*21,23
I_{A1}	*а*	0,55	0,615	0,66	0,83	0,96
I_{A2}	»	0,92	0,905	0,899	0,869	0,828
I_A	»	1,08	1,146	1,18	1,3	1,36
I_B	»	2,105	2,08	2,14	2,22	2,33
I	»	3,1	3,17	3,23	3,32	3,51
$P_э$	*вт*	91,5	97,4	94	76	28,1
$M_э$	*Г см*	3 070	3 160	3 020	2 470	930
P_R	*вт*	70	70,7	60,8	34,7	—
n	*об/мин*	2 430	2 280	2 130	1 500	—
M	*Г·см*	2 800	3 020	2 800	2 250	—

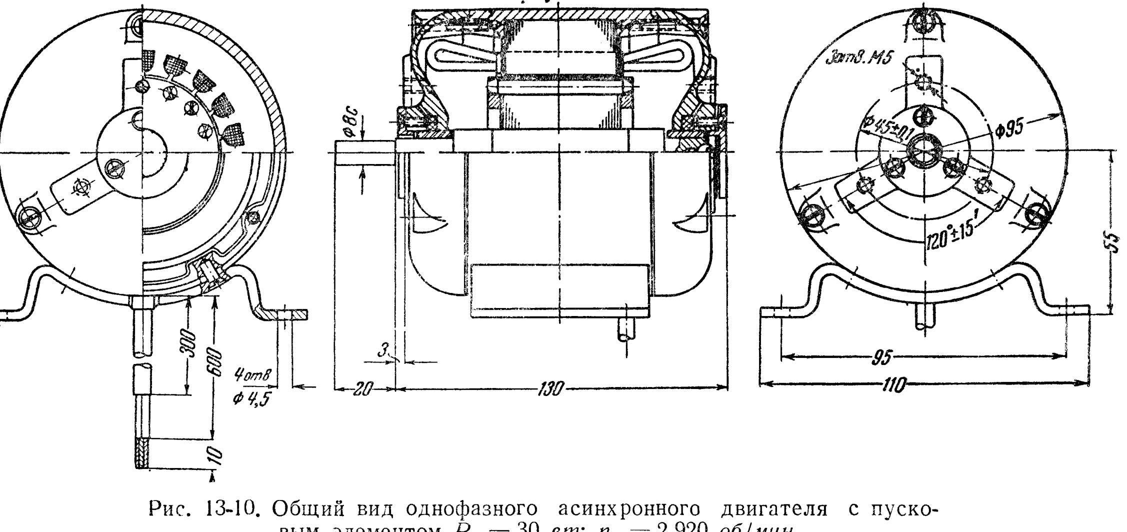


Рис. 13-10. Общий вид однофазного асинхронного двигателя с пусковым элементом $P_{н} = 30$ *вт*; $n_{н} = 2\,920$ *об/мин*.

Двигатель закрытого исполнения с естественным охлаждением может работать нормально как при горизонтальном, так и при вертикальном положениях вала. Для обеспечения условия малошумности двигатель выполнен на подшипниках скольжения.

На рисунке указаны габаритные и установочные размеры двигателя. Вес двигателя 2,5 *кг.*

13-2. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПУСКОВОЙ ЕМКОСТЬЮ

В настоящем параграфе рассматривается однофазный двигатель, который в отношении рабочих свойств, условий работы и конструктивных особенностей не отличается от двигателя с пусковым сопротивлением (см. § 13-1). Его паспортные данные:

$$P_{\text{н}} = 30 \text{ вт};\ n_{\text{с}} = 3\,000 \text{ об/мин};\ f = 50 \text{ гц};\ U_{\text{п}} = 220 \text{ в}.$$

Изменены требования к пусковому режиму, а именно: требуемая кратность пускового момента должна быть $m_{\text{к}} = 2{,}2$.

Для того чтобы спроектировать двигатель, отвечающий указанному требованию, следует пересчитать только вспомогательную фазу, т. е. рассчитать двигатель с пусковой емкостью (см. схему на рис. 8-1,*а*).

Исходными данными для расчета являются параметры схемы замещения при пуске (из § 13-1):

$$r_{SA} = 102{,}5 \text{ ом};\ r'_{RA\text{к}} = 45{,}9 \text{ ом};$$

$$x_{SA} = 38{,}8 \text{ ом};\ x'_{RA\text{к}} = 27{,}5 \text{ ом};$$

$$r_{A\,\text{к}} = r_{SA} + r'_{RA\,\text{к}} = 102{,}5 + 45{,}9 = 148{,}4 \text{ ом};$$

$$x_{A\,\text{к}} = x_{SA} + x'_{RA\,\text{к}} = 38{,}8 + 27{,}5 = 66{,}3 \text{ ом}.$$

Для выбора оптимального коэффициента трансформации производим расчет пусковых характеристик при нескольких значениях k: $k = 0{,}6;\ 0{,}7;\ 0{,}8$ и 1 и двух значениях t:

$$t = \frac{S_A}{S_B} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{k_{\text{о}\,B}}{k_{\text{о}\,A}} = 1{,}5k \text{ и } t = k.$$

Результаты расчета пусковых характеристик по условию заданной кратности $m_{\text{к}} = 2{,}2$ приведены в табл. 13-5, в которой указаны пусковой момент $M_{\text{к}}$, пусковой ток $I_{\text{к}}$, кратность пускового тока $i_{\text{к}}$, емкость пускового конденсатора C и напряжение на нем U_C.

Как видно из табл. 13-5, варианты с $t = k$ дают меньшую величину емкости, чем варианты с $t > k$ $(t = 1{,}5k)$.

При увеличении коэффициента трансформации пусковой ток практически не меняется и только немного возрастает при больших k. Коэффициент заполнения паза при увеличении k растет.

Таблица 13-5

Варианты расчета

		$t=1{,}5\ k$				$t=k$				
k	—	0,6	0,7	0,8	1	0,6	0,8	0,9	1	1,2
$M_к$	*кГ·см*	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
$I_к$	*а*	1,68	1,64	1,55	1,69	1,51	1,52	1,55	1,71	1,76
$i_к$	—	4	3,9	3,7	4	3,6	3,62	3,69	4,07	4,2
C	*мкф*	13,8	11,4	10,45	9,50	12,8	9,25	8,42	7,60	6,65
$U_с$	*в*	226,5	225	219,5	198	235,5	242	241	235,5	229

Оптимальный вариант выбираем из условия получения наименьшей емкости и заданной кратности пускового тока (в нашем случае $i_к < 4$) при допустимом коэффициенте заполнения паза ($k_{зап} \leqslant 0{,}75$):

$$t = k = 0{,}9.$$

Обмоточный коэффициент вспомогательной обмотки из § 13-1 $k_{оB} = 0{,}833$.

Число витков вспомогательной обмотки при выбранном коэффициенте трансформации

$$w_B \doteq k w_A \frac{k_{оA}}{k_{оB}} = 0{,}9 \cdot 1\,344 \cdot \frac{0{,}722}{0{,}833} = 1\,050.$$

Число проводников в пазу

$$u_п = \frac{w_B}{Q_B} = \frac{1\,050}{3} = 350.$$

Активное сопротивление схемы замещения для вспомогательной фазы при пуске

$$r'_{B\,к} = r_{B\,к} = kta\left(\frac{k_{оA}}{k_{оB}}\right)^2 r_{SA} + k^2 r'_{RA\,к} =$$

$$= 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 2\left(\frac{0{,}722}{0{,}833}\right)^2 \cdot 102{,}5 + 0{,}9^2 \cdot 45{,}9 = 162\ ом.$$

Активное сопротивление вспомогательной обмотки при пуске

$$r'_{SB75} = r_{B\,к} - k^2 r'_{RA\,к} = 162 - 0{,}9^2 \cdot 45{,}9 = 124{,}8\ ом.$$

Длина провода вспомогательной обмотки

$$L_{SB} = L_{SA}\frac{w_{SB}}{w_{SA}} = 356\frac{1\,050}{1\,344} = 278\ м.$$

Сечение провода вспомогательной обмотки

$$S'_{SB} = \rho_{75}\frac{L_{SB}}{r'_{SB75}} = \frac{1}{46} \cdot \frac{278}{124{,}8} = 0{,}0485\ мм^2.$$

Ближайшее стандартное сечение $s_{SB} = 0{,}0491$ *мм²*.

Выбираем провод ПЭВ-2

$$\frac{d_{\text{гол}}}{d_{\text{из}}} = \frac{0,25}{0,30}.$$

Коэффициент заполнения паза

$$k_{\text{зап}} = \frac{d_{\text{из}}^2 u_{\text{п}}}{S_{\text{п}} - S_{\text{из}}} = \frac{0,30^2 \cdot 350}{46,1} = 0,68.$$

В соответствии со стандартным сечением провода изменяются. активное сопротивление обмотки

$$r_{SB} = r'_{SB} \frac{s'_{SB}}{s_{SB}} = 124,8 \frac{0,0485}{0,0491} = 123{,}0 \text{ ом};$$

активное сопротивление схемы замещения вспомогательной фазы при пуске

$$r_{B\,\text{к}} = r_{SB} + k^2 r'_{RA\,\text{к}} = 123{,}0 + 0{,}9^2 \cdot 45,9 = 160{,}2 \text{ ом}.$$

Реактивное сопротивление схемы замещения для вспомогательной фазы B при пуске без пускового элемента

$$x_{B\,\text{к}} = k^2 a \left(\frac{k_{0A}}{k_{0B}}\right)^2 x_{SA} + k^2 x'_{RA\,\text{к}} =$$

$$0{,}9^2 \cdot 2 \left(\frac{0,722}{0,833}\right)^2 \cdot 38{,}8 + 0{,}9^2 \cdot 27{,}5 = 69{,}6 \text{ ом}$$

Пусковой момент при заданной кратности $m_{\text{к}} = 2{,}2$

$$M_{\text{к}} = 2{,}2 M_{\text{н}} = 2{,}2 \cdot 1 = 2{,}2 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Реактивное сопротивление вспомогательной фазы при пуске с учетом пускового элемента находим из условия заданной кратности пускового момента $m_{\text{к}} = 2{,}2$.

Определяем коэффициент A и реактивное сопротивление $x'_{B\,\text{к}}$:

$$A = \frac{97{,}4 k U_{\text{н}}^2 r'_{RA\,\text{к}}}{n_{\text{с}} (r_{A\,\text{к}}^2 + x_{A\,\text{к}}^2)} = \frac{97{,}4 \cdot 0{,}9 \cdot 220^2 \cdot 45{,}9}{3\,000(148{,}4^2 + 66{,}3^2)} = 2{,}36;$$

$$x'_{B\,\text{к}} = \frac{-A r_{A\,\text{к}} - \sqrt{A^2 r_{A\,\text{к}}^2 - M_{\text{к}} (M_{\text{к}} r'^2_{B\,\text{к}} - 2A r'_{B\,\text{к}} x_{A\,\text{к}}}}{M_{\text{к}}} =$$

$$= \frac{-2{,}36 \cdot 148{,}4 - \sqrt{(2{,}36 \cdot 148{,}4)^2 - 2{,}2\,(2{,}2 \cdot 162^2 - 2 \cdot 2{,}36 \cdot 160{,}2 \cdot 66{,}3)}}{2,2} =$$

$$= -308 \text{ ом};$$

$$|x'_{B\,\text{к}}| = 308 \text{ ом}.$$

Емкостное сопротивление

$$|x_{C\text{п}}| = |x'_{B\text{ к}}| + x_{B\text{ к}} = 308 + 69{,}6 = 377{,}6 \ \textit{ом}.$$

Емкость пускового конденсатора

$$C_{\text{п}} = \frac{10^6}{2\pi f\, x_{C\text{ п}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 377{,}6} = 8{,}42 \ \textit{мкф}.$$

Берем $C_{\text{п}} = 8$ *мкф*.

При этой емкости

$$x_{C\text{ п}} = \frac{10^6}{2\pi f C_{\text{п}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 8} = 399 \ \textit{ом};$$

$$|x'_{B\text{ к}}| = |x_{C\text{ п}}| - x_{B\text{ к}} = 399 - 69{,}6 = 329{,}4 \ \textit{ом}.$$

Определяем пусковые токи—в главной обмотке $I_{A\text{ к}}$ и линейный $I_{\text{к}}$:

$$I_{A\text{ к}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{r^2_{A\text{ к}} + x^2_{A\text{ к}}}} = \frac{220}{\sqrt{148{,}4^2 + 66{,}3^2}} = 1{,}36 \ a;$$

$$I_{\text{к}} = I_{A\text{ к}} \sqrt{\frac{(r_{A\text{ к}} + r_{B\text{ к}})^2 + (x_{A\text{ к}} + x'_{B\text{ к}})^2}{(r_{B\text{ к}})^2 + (x'_{B\text{ к}})^2}} =$$

$$= 1{,}36 \sqrt{\frac{(148{,}4 + 160{,}2)^2 + (66{,}3 - 308)^2}{160{,}2^2 + 308^2}} = 1{,}55 \ a.$$

Кратность пускового тока

$$i_{\text{к}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{н}}} = \frac{1{,}55}{0{,}42} = 3{,}69.$$

Коэффициент мощности главной фазы при пуске

$$\cos \varphi_{A\text{ к}} = \frac{r_{A\text{ к}}}{\sqrt{r^2_{A\text{ к}} + x^2_{A\text{ к}}}} = \frac{148{,}4}{\sqrt{148{,}4^2 + 66{,}3^2}} = 0{,}91.$$

Ток вспомогательной фазы при пуске

$$I_{B\text{ к}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{(r_{B\text{ к}})^2 + (x'_{B\text{ к}})^2}} = \frac{220}{\sqrt{160{,}2^2 + 329{,}4^2}} = 0{,}605 \ a.$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы при пуске

$$\cos \varphi_{B\text{ к}} = \frac{r_{B\text{ к}}}{\sqrt{(r_{B\text{ к}})^2 + (x'_{B\text{ к}})^2}} = \frac{160{,}2}{\sqrt{160{,}2^2 + 329^2}} = 0{,}454.$$

Плотность тока в главной обмотке при пуске

$$\Delta_{A\text{ к}} = \frac{I_{A\text{ к}}}{s_{SA}} = \frac{1{,}36}{0{,}075} = 18{,}1 \ a/\textit{мм}^2.$$

Плотность тока во вспомогательной обмотке при пуске:

$$\Delta_{B\,к} = \frac{I_{B\,к}}{s_{SB}} = \frac{0,605}{0,0491} = 12,3 \ а/мм^2.$$

Пусковой момент при округленном значении емкости практически мало отличается от заданной кратности $m_к = 2,2$:

$$M_к = 2A \frac{r_{B\,к} x_{A\,к} - x'_{B\,к} r_{A\,к}}{r^2_{B\,к} + x'^2_{B\,к}} =$$

$$= 2 \cdot 2,36 \frac{160,2 \cdot 66,3 + 329,4 \cdot 148,4}{160,2^2 + 329,4^2} = 2,16 \ кГ \cdot см.$$

Напряжение на вспомогательной обмотке при пуске

$$\dot{U}_B = \dot{I}_{B\,к} \cdot Z_{B\,к} = (0,268 + j0,546)(160,2 + j69,6) = 2 + j106,$$

где

$$\dot{I}_{B\,к} = \frac{\dot{U}_н}{Z'_{B\,к}} = \frac{220}{r_{B\,к} + jx'_{B\,к}} = \frac{220}{160,2 - j329,4} = 0,268 + j0,546;$$

$$U_B = 106 \ в.$$

Напряжение на конденсаторе

$$\dot{U}_C = \dot{I}_{B\,к} Z_C = \dot{I}_{B\,к}(-jx_C) = -(0,268 + j0,546) \cdot j399 = -217 + j107;$$

$$U_C = 241 \ в.$$

Согласно приложению 8-2 выбираем пусковой конденсатор ЭП-300-8.

На рис. 13-11 приведена векторная диаграмма токов двигателя с пусковой емкостью при скольжении $s = 1$. Сравнение ее с векторной диаграммой токов для двигателя с пусковым сопротивлением (см. рис. 13-5) показывает преимущество двигателя с пусковой емкостью, позволяющего при большей кратности пускового момента ($m_к = 2,2$ вместо $m_к = 0,93$) резко снизить кратность пускового тока (до $i_к = 3,68$ вместо $i_к = 8,36$).

На рис. 13-12 приведена круговая диаграмма пускового тока, построенная для выбранных коэффициента трансформации и сечения провода вспомогательной фазы при $r_{Bк} = 160,2$ *ом*.

Диаметр круговой диаграммы

$$D = \frac{U_н}{r_{Bк}} = \frac{220}{160,2} = 1,37 \ а.$$

Для определения масштаба моментов в круговой диаграмме определяем максимальный пусковой момент:

$$M_{к\,макс} = A \frac{\sqrt{r^2_{A\,к} + x^2_{A\,к}} + x_{A\,к}}{r_{B\,к}} = 2,36 \frac{\sqrt{148,4^2 + 66,3^2} + 66,3}{160,2} =$$

$$= 3,37 \ кГ \cdot см.$$

Масштаб моментов

$$\mu_M = \frac{M_{\text{кмакс}}}{DF} = \frac{3,37}{39} = 865 \ кГ \cdot см/мм.$$

Вспомогательная фаза проектировалась из условия получения заданной кратности пускового момента $m_{\text{к}} = 2,2$, т. е. $M_{\text{к}} = 2,2 \ кГ \cdot см$.

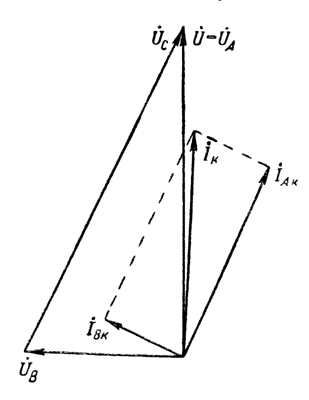


Рис. 13-11. Векторная диаграмма однофазного двигателя с пусковой емкостью.

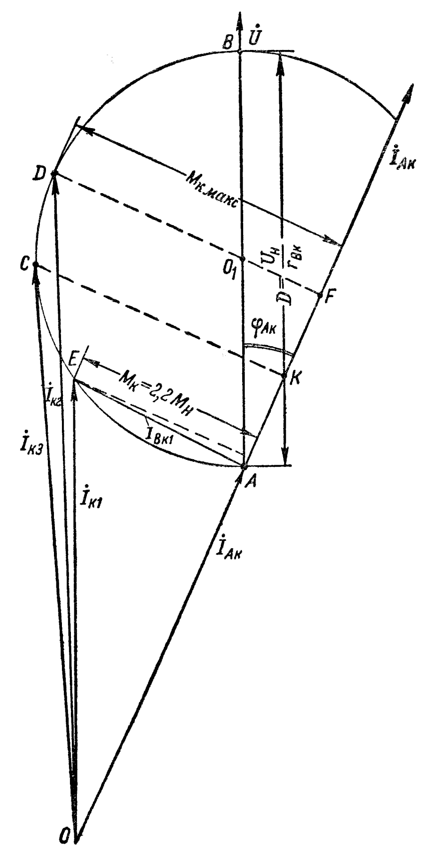


Рис. 13-12. Круговая диаграмма пусковых токов однофазного двигателя с пусковой емкостью.

Реактивное сопротивление вспомогательной фазы, найденное для заданного условия (точка E круговой диаграммы):

$$x'_{B\text{к}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{н}}}{I_{B\text{к}}}\right)^2 - r^2_{B\text{к}}} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{220}{0,64}\right)^2 - 160^2} = 306 \ ом.$$

Реактивное сопротивление пускового конденсатора

$$|x_{C\text{п}}| = |x'_{B\text{к}}| + x_{B\text{к}} = 306 +$$

$$+ 69,6 = 375,6 \ ом;$$

$$C_{\text{п}} = \frac{10^6}{2\pi f \cdot x_{C\text{п}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 375,6} = 8,5 \ мкф.$$

Величина емкости пускового конденсатора практически та же, что и полученная аналитическим методом. Линейный пусковой ток

$$I_{\text{к}1} = 1,54 \ a \ (i_{\text{к}} = 3,67).$$

Из круговой диаграммы следует, что максимальный момент, который можно было бы получить в данном двигателе (точка D): $M_{к\,макс} = 3{,}37$ *кГ·см*, соответствует линейному пусковому току $I_{к2} = 2{,}21$ *а* ($i_к = 5{,}3$).

При максимальной добротности (точка C) пусковой момент равен $M_к = 3{,}14$ *кГ·см*; линейный пусковой ток $I_{к3} = 1{,}9$ *а* ($i_к = 4{,}52$).

13-3. РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННО ВКЛЮЧЕННОЙ ЕМКОСТЬЮ

Цель настоящего примера расчета — показать особенности конденсаторного двигателя.

Рассчитываем конденсаторный двигатель с постоянно включенной емкостью (см. рис. 8-2).

Полезная номинальная мощность $P_н = 50$ *вт*.

Синхронная скорость двигателя $n_с = 3\,000$ *об/мин*.

Номинальное напряжение $U_н = 220$ *в*.

Не повторяя расчета основных размеров машины, используем данные двигателя, спроектированного в первом примере (см. § 13-1). Неизменными остаются габаритные размеры, штамп статора и ротора. Проектируем заново только обмотку статора. Рассчитываем все величины для двух режимов, номинального и пускового.

Обмотка статора

Число пазов на статоре $Z_S = 18$. При этом числе пазов для конденсаторного двигателя, имеющего две обмотки на статоре, расположенные в равном числе пазов, возможны два варианта: 1) либо с дробным числом пазов на полюс и фазу: $q = Q_A = Q_B = \frac{{}^1\!/\!_2 Z_S}{2p} = \frac{9}{2} = 4\frac{1}{2}$; 2) либо $q = Q_A = Q_B = 4$ при двух незаполненных пазах. Выбираем второй вариант, осуществленный в конденсаторных двигателях единой серии нулевого габарита.

Выбираем на статоре однослойную двухплоскостную „расчесанную" обмотку (рис. 13-13) с шагом $y = \tau = \frac{Z_S}{2p} = \frac{18}{2} = 9$.

Обмоточный коэффициент для двухфазной обмотки

$$k_о = \frac{0{,}707}{q\sin\frac{45^\circ}{q}} = \frac{0{,}707}{4\sin\frac{45^\circ}{4}} = \frac{0{,}707}{4\sin 11^\circ 15'} = 0{,}906.$$

Принимаем предварительно:

$$k_z = 1{,}1;\ \alpha_\delta = 0{,}665;\ k_B = 1{,}1;\ B_\delta = 4\,900\ гс.$$

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi = \alpha_\delta \tau l B_\delta = 0{,}665 \cdot 8{,}1 \cdot 3{,}8 \cdot 4\,900 = 10^5\ мкс.$$

Принимаем (предварительно) $k_E = 0{,}9$.

Число витков главной обмотки

$$w_{SA}=\frac{U_{н}k_{E}\cdot 10^{8}}{4k_{B}f\Phi k_{о}}=\frac{220\cdot 0{,}90\cdot 10^{8}}{4\cdot 1{,}1\cdot 50\cdot 10^{5}\cdot 0{,}906}=992.$$

Число проводников в пазу

$$u_{пA}=\frac{w_{SA}a}{pq}=\frac{992\cdot 1}{1\cdot 4}=248.$$

Получив из кривой рис. 1-2 $\eta_{II}\cos\varphi_{II}=0{,}52$, в соответствии с $P_{н}=50$ *вт*, определяем номинальный ток в главной обмотке (предварительно):

$$I_{нA}=\frac{P'_{S}}{\sqrt{2}U_{н}}=\frac{P_{н}}{\eta_{II}\cos\varphi_{II}\sqrt{2}U_{н}}=\frac{50}{0{,}52\sqrt{2}\cdot 220}=0{,}308\ a$$

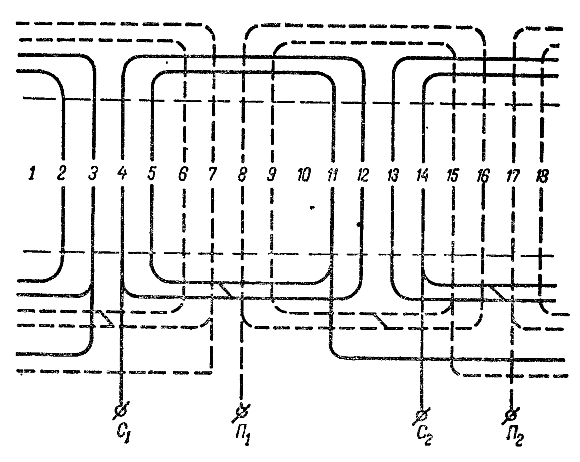


Рис. 13-13. Схема обмотки конденсаторного двигателя. $Z_{s}=18$; $2p=2$; $Q_{A}=Q_{B}=4$.

Находим сечение провода главной обмотки статора при выбранной плотности тока $\Delta_{S}=5{,}5$ *а/мм²*:

$$S'_{SA}=\frac{I_{нA}}{a\Delta_{S}}=\frac{0{,}308}{1\cdot 5{,}5}=0{,}056\ мм^{2}.$$

Ближайшее сечение по стандарту $S_{SA}=0{,}0573$ *мм²*; диаметр голого провода $d_{гол}=0{,}27$ *мм*. Выбираем провод марки ПЭВ-2; диаметр изолированного провода $d_{из}=0{,}32$ *мм*.

Сечение меди в пазу

$$S_{MSA}=s_{SA}u_{пA}=0{,}0573\cdot 248=14{,}2\ мм^{2}.$$

Коэффициент заполнения для главной обмотки

$$k_{зап}=\frac{d_{из}^{2}u_{пA}}{S_{пA}-S_{из}}=\frac{0{,}32^{2}\cdot 248}{55{,}1-8}=0{,}54.$$

Сопротивления обмоток статора

Определив средний шаг секции по пазам $y_{ср} = 7$, рассчитываем среднюю длину лобовой части:

$$l_{лS} = k_1 \tau_y \beta + 2B = k_1 \frac{\pi (D + h_{ns})}{2p} \frac{y_{ср}}{\tau} + 2B = 1,2 \frac{\pi (5,15 + 0,85)}{2} \times$$

$$\times \frac{7}{9} + 2 \cdot 1 = 10,82 \text{ см}.$$

Средняя длина полувитка

$$l_{ср} = l + l_{лS} = 3,8 + 10,82 = 14,62 \text{ см}.$$

Общая длина провода главной обмотки

$$L_{SA} = 2 l_{ср} w_{SA} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 14,62 \cdot 992 \cdot 10^{-2} = 289,5 \text{ м}.$$

Активное сопротивление главной обмотки

$$r_{SA} = \rho \frac{L_{SA}}{S_S \cdot a} = \frac{1}{46} \cdot \frac{289,5}{0,0573 \cdot 1} = 109,5 \text{ ом}.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния для однослойной обмотки и полуовального паза

$$\lambda_п = \left[\frac{h_1}{3d_2} k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_щ}{2d_2} + \frac{h_2}{d_2} + \frac{h_щ}{b_щ} \right) k_{\beta 1} \right] =$$

$$= \left[\frac{3,83}{3 \cdot 7,15} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,15} + \frac{0,3}{7,15} + \frac{0,5}{1,5} \right) 1 \right] = 1,231.$$

Для двухфазной однослойной обмотки с $q > 1$ находим по табл. 4-4 коэффициенты $k_{\beta 1} = \beta = 1$; $N = 1$ и

$$\xi_S = 2 \left(F k_{\beta 1} - \frac{F_1 N}{2Q} \right) - \Delta_z \left(G k_{\beta 1} - \frac{G_1 N}{2Q} \right) -$$

$$- k_0^2 \left(\frac{t_R}{t_S} \right)^2 (1 + \beta_{ск}^2) = 2 \left(1,75 \cdot 1 - \frac{0,17 \cdot 1}{2 \cdot 4} \right) -$$

$$- 0,06 \left(0,8 \cdot 1 - \frac{0,37 \cdot 1}{2 \cdot 4} \right) - 0,906^2 \cdot 1,18^2 (1 + 0,85^2) = 1,45.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_\delta = \frac{t_S}{11,9 \delta k_\delta} \xi_S = \frac{9}{11,9 \cdot 0,3 \cdot 1,17} \cdot 1,45 = 3,12.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния для двухфазной катушечной обмотки с числом катушечных групп $2p$

$$\lambda_л = 0,27 \frac{q}{l} (l_л - 0,64\tau) = 0,27 \frac{4}{3,8} (10,82 - 0,64 \cdot 8,1) = 1,6.$$

Суммарный коэффициент магнитной проводимости

$$\Sigma\lambda = \lambda_п + \lambda_\delta + \lambda_л = 1,231 + 3,12 + 1,6 = 5,95.$$

Индуктивное сопротивление главной обмотки статора

$$x_{SA} = 0,158 \frac{f}{100}\left(\frac{w_{SA}}{100}\right)^2 \frac{l}{pq} \Sigma\lambda = 0,158 \cdot \frac{50}{100}\left(\frac{992}{100}\right)^2 \frac{3,8}{1 \cdot 4}\ 5,95 =$$
$$= 43,7\ ом.$$

Расчет магнитной цепи

Результаты расчета магнитной цепи сведены в табл. 13-6.

Таблица 13-6

К расчету магнитной цепи

Наименование участка магнитной цепи	Индукция, *гс*	Магнитное напряжение, *а*
Воздушный зазор	B_δ=4 900	F_δ=276
Зубцы статора	B_{ZS}=14 350	F_{ZS}=31
Ярмо статора	B_{aS}=13 800	F_{aS}=69,5
Зубцы ротора	B_{ZR}=11 350	F_{ZR}=7,36
Ярмо ротора	B_{aR}=9 900	F_{aR}=12,6

Коэффициент насыщения

$$k_Z = \frac{F_\delta + F_{ZS} + F_{ZR}}{F_\delta} = \frac{276 + 31 + 7,36}{276} = 1,14.$$

Полученное значение мало отличается от принятого $k_Z = 1,1$, поэтому пересчета не делаем.

Намагничивающая сила магнитной цепи

$$F_{цепи} = F_\delta + F_{ZS} + F_{aS} + F_{ZR} + F_{aR} =$$
$$= 276 + 31 + 69,5 + 7,36 + 12,6 = 396,46\ a.$$

Намагничивающий ток

$$I_\mu = \frac{pF_{цепи}}{0,9mw_Sk_0} = \frac{1 \cdot 396,46}{0,9 \cdot 2 \cdot 992 \cdot 0,906} = 0,245\ a.$$

Индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре,

$$x_{mA} = \frac{k_E U_н}{I_\mu} = \frac{0,9 \cdot 220}{0,245} = 805\ ом.$$

Коэффициент k_E проверяем с помощью векторной диаграммы по предварительному значению тока $I_{нA}$, рассчитанным параметрам r_{SA} и x_{SA} и $\cos\varphi = 0,92$ по рис. 2-17. Согласно векторной диаграмме $k_E = 0,88$, что мало отличается от ранее выбранного значения.

Расчет номинального режима

Исходные параметры схемы замещения главной фазы:

$$r_{SA} = 109{,}5 \ \text{ом}; \ x_{SA} = 43{,}7 \ \text{ом}; \ x_{mA} = 805 \ \text{ом}.$$

Приведенное активное сопротивление ротора

$$r_{RA} = \frac{r_э 4 m w_{SA}^2 k_{оA}}{Z_R k_{ск}^2} = \frac{0{,}945 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 2 \cdot 992^2 \cdot 0{,}906^2}{15 \cdot 0{,}99^2} = 41 \ \text{ом}.$$

Приведенное реактивное сопротивление ротора

$$x_{RA} = x_S \frac{\Sigma\lambda'_R}{\Sigma\lambda_S} = 43{,}7 \cdot \frac{4{,}48}{5{,}95} = 32{,}9 \ \text{ом},$$

где

$$\Sigma\lambda'_R = \Sigma\lambda_R \frac{l_R}{l} \cdot \frac{Z_S}{Z_R} \left(\frac{k_{оA}}{k_{оR}} \right)^2 = 4{,}29 \cdot \frac{4{,}18}{3{,}8 \cdot 15} \left(\frac{0{,}9}{0{,}99} \right)^2 = 4{,}48.$$

Номинальное скольжение принимаем $s_н = 0{,}03$. Рассчитываем коэффициенты α и β для сопротивлений разветвления:

$$\alpha = \frac{r_{RA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{41}{805 + 32{,}9} = 0{,}049;$$

$$\beta = \frac{x_{mA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{805}{805 + 32{,}9} = 0{,}962.$$

Активное сопротивление разветвления

$$r'_{RA1} = \frac{\alpha\beta x_{mA} s}{\alpha^2 + s^2} = \frac{0{,}049 \cdot 0{,}962 \cdot 805 \cdot 0{,}03}{24 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4}} = 345 \ \text{ом}.$$

Реактивное сопротивление разветвления

$$x'_{RA1} = \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}} \alpha + s^2}{\alpha^2 + s^2} =$$

$$= 0{,}962 \cdot 32{,}9 \frac{\frac{41}{32{,}9} \cdot 0{,}049 + 0{,}03^2}{24 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4}} = 593 \ \text{ом}.$$

Полное сопротивление главной фазы

$$Z_{A1} = (r_{SA} + r'_{RA1}) + j(x_{SA} + x'_{RA1}) = (109{,}5 + 345) +$$

$$+ j(43{,}7 + 593) = 454{,}5 + j636{,}7; \ Z_{A1} = 784 \ \text{ом}.$$

Ток в главной обмотке без учета потерь в стали

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}_н}{Z_{A1}} = \frac{220}{454 + j636,7} = 0,163 - j0,229;$$

$$I_{A1} = I_{нA} = 0,28 \ a.$$

Полное сопротивление разветвления

$$Z'_{RA1} = 345 + j593; \qquad z'_{RA1} = 685 \ ом.$$

Электродвижущая сила

$$E_1 = I_{A1} z'_{RA1} = 0,28 \cdot 685 = 192 \ в.$$

Электромагнитная мощность

$$P_э = mI^2_{A1} r'_{RA1} = 2 \cdot 0,28^2 \cdot 345 = 53,8 \ вт.$$

Полная механическая мощность на валу двигателя

$$P'_R = P_э (1 - s) = 53,8 \cdot 0,97 = 52 \ вт.$$

Полезная механическая мощность на валу

$$P_R = P'_R - P_{мех} - P_{доб} = 52 - 3,5 = 48,5 \ вт.$$

Принимаем

$$P_{мех} + P_{доб} = 3,5 \ вт.$$

Полезный момент

$$M = \frac{P_R \cdot 10^{+5}}{1,028n} = \frac{48,5 \cdot 10^{+5}}{1,028 \cdot 2\,910} = 1\,620 \ Г \cdot см.$$

Потери в стали рассчитываем, используя расчетные потери из первого примера.

Потери в стали статора

$$P_{cS1} = P_{cS} \left(\frac{E_1}{k_E U_н} \right)^2 = 5,85 \left(\frac{192}{176} \right)^2 = 6,96 \ вт.$$

Потери в стали ротора

$$P_{cR1} = P_{cR} \left(\frac{E_1}{k_E U_н} \right)^2 s^{1,3} = 1,89 \cdot 1,19 \cdot 0,03^{1,3} = 0,0236 \ вт,$$

где P_{cR} берут из первого примера для

$$k_E U_н = 0,8 \cdot 220 = 176 \ в.$$

Суммарные потери в стали

$$P_c = P_{cS1} + P_{cR1} = 6,96 + 0,024 = 6,98 \ вт.$$

Ток потерь в стали

$$I_c = \frac{P_{cS1} + P_{cR1}}{2E_1} = \frac{6,98}{2 \cdot 192} = 0,0182 \ a.$$

Ток в главной обмотке с учетом потерь в стали

$$\dot{I}_{SA} = I'_{SA} + jI''_{SA} = (0,163 + 0,018) - j0,229 = 0,181 - j0,229$$

$$I_{SA} = 0,292 \ a.$$

Плотность тока в главной обмотке

$$\Delta_A = \frac{I_{SA}}{s_A} = \frac{0,292}{0,0573} = 5,1 \ a/мм^2.$$

Коэффициент мощности главной фазы

$$\cos \varphi_A = \frac{I'_{SA}}{I_{SA}} = \frac{0,181}{0,292} = 0,62.$$

Потери в меди статора

$$P_{MS} = 2I^2_{SA} r_{SA} = 2 \cdot 0,292^2 \cdot 109,5 = 18,7 \ вт.$$

Потребляемая мощность

$$P_S = P_э + P_{MS} + P_с = 53,8 + 18,7 + 6,98 = 79,48 \ вт.$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} = \frac{48,5}{79,48} = 0,61.$$

Расчет вспомогательной обмотки

Рассчитываем вспомогательную обмотку из условия кругового поля в номинальном режиме[1].

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{x_{A1}}{r_{A1}} = \frac{636,7}{454,5} = 1,4.$$

Емкость во вспомогательной обмотке

$$x_{Cф} = k^2 x_{A1} + k r_{A1} = 1,4^2 \cdot 636,7 + 1,4 \cdot 454,5 = 1\,888 \ ом;$$

$$C_р = \frac{10^6}{2\pi f x_{Cф}} = \frac{10^6}{314 \cdot 1\,888} = 1,69 \ мкф.$$

Берем ближайший по емкости конденсатор $C_р = 2$ *мкф*; тогда

$$x_{C_р} = \frac{10^6}{2\pi f C_р} = \frac{10^6}{314 \cdot 2} = 1\,590 \ ом.$$

Число витков вспомогательной обмотки

$$w_B = k w_A = 1,4 \cdot 992 = 1\,390.$$

---

[1] Возможно и отступление от этого условия, т. е. получение кругового поля для скольжения $s > s_н$ с целью увеличения пускового момента.

Принимая $k=t$, определяем сечение провода вспомогательной обмотки:

$$S'_B = \frac{S_A}{t} = \frac{0,0573}{1,4} = 0,041 \text{ мм}^2.$$

Ближайшее стандартное сечение $S_B = 0,0415$ $мм^2$. Диаметр провода $d_{гол} = 0,23$ $мм$; $d_{из} = 0,28$ $мм$.

Активное сопротивление

$$r_{SB} = k^2 r_{SA} \frac{S'_B}{S_B} = 1,4^2 \cdot 109,5 \frac{0,041}{0,0415} = 212 \text{ ом}.$$

Полное сопротивление вспомогательной фазы

$$Z'_{B1} = (k^2 r_{A1} + r_C) + j(k^2 x_{A1} - x_{Cp}) =$$

$$= 1,4^2 \cdot 454,5 + j(1,4^2 \cdot 636,7 - 1\,590) = 890 - j340.$$

Так как из-за округления величины рабочей емкости мы несколько отступили от условий получения кругового поля, уточняем номинальный режим по формулам для общего случая эллиптического вращающегося поля.

Сопротивления разветвления главной фазы обратной последовательности:

$$r'_{RA2} = \frac{\alpha\beta x_{mA}(2-s)}{\alpha^2 + (2-s)^2} = \frac{0,049 \cdot 0,962 \cdot 805 \cdot 1,97}{0,049^2 + 1,97^2} = 19,1 \text{ ом};$$

$$x'_{RA2} = \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}}\alpha + (2-s)^2}{\alpha^2 + (2-s)^2} =$$

$$= 0,962 \cdot 32,9 \frac{\frac{41}{32,9} \cdot 0,049 + 1,97^2}{0,049^2 + 1,97^2} = 32,1 \text{ ом};$$

$$Z'_{RA2} = r'_{RA2} + jx'_{RA2} = 19,1 + j32,1;$$

$$z'_{RA2} = 37,4 \text{ ом}.$$

Полное сопротивление главной фазы обратной последовательности

$$Z_{A2} = (r_{SA} + r'_{RA2}) + j(x_{SA} + x'_{RA2}) =$$

$$= (109,5 + 19,2) + j(43,7 + 32,1) = 128,7 + j75,8 \text{ ом}.$$

Полные сопротивления вспомогательной фазы прямой и обратной последовательностей:

$$Z_{B1} = k^2 r_{A1} + j(k^2 x_{A1} - x_C) =$$

$$= 1,4^2 \cdot 454,5 + j(1,4^2 \cdot 636,7 - 1\,590) = 890 - j340 \text{ ом};$$

$$Z_{B2} = k^2 r_{A2} + j(k^2 x_{A2} - x_C) =$$

$$= 1,4^2 \cdot 128,7 + j(1,4^2 \cdot 75,8 - 1\,590) = 252 - j1\,441 \text{ ом}.$$

Составляющие тока статора прямой и обратной последовательностей главной фазы:

$$\dot I_{A1} = \dot U_{н} \frac{Z_{B2} - jkZ_{A2}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} =$$

$$= 220 \frac{252 - j1\,441 - j1{,}4\,(128{,}7 + j75{,}8)\cdot}{(454{,}5 + j636{,}7)\,(252 - j1\,441) + (128{,}7 + j75{,}8)\,(890 - j340)} =$$

$$= 0{,}163 - j0{,}238;$$

$$I_{A1} = 0{,}289 \ a;$$

$$\dot I_{A2} = \dot U_{н} \frac{Z_{B1} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} =$$

$$= 220 \frac{890 - j340 + j1{,}4\,(454{,}5 + j636{,}7)}{(454{,}5 + j636{,}7)\,(252 - j1\,441) + (128{,}7 + j75{,}8)\,(890 - j340)} =$$

$$= -0{,}0191 + j0{,}0478;$$

$$I_{A2} = 0{,}0575 \ a.$$

Ток статора главной фазы без учета потерь в стали

$$\dot I_{A} = \dot I_{A1} + \dot I_{A2} = 0{,}163 - j0{,}238 - 0{,}0191 + j0{,}0478 = 0{,}144 - j0{,}19;$$

$$I_{A} = 0{,}245 \ a.$$

Потери в стали от поля прямой последовательности при $E_1 = I_{A1} z'_{RA1} = 0{,}289 \cdot 685 = 198$ *в*:

$$P_{cS1} = P'_{cS} \left(\frac{E_1}{U_{н} k_E}\right)^2 = 5{,}85 \left(\frac{198}{220 \cdot 0{,}8}\right)^2 = 7{,}4 \ вт;$$

$$P_{cR1} = P'_{cR} \left(\frac{E_1}{U_{н} k_E}\right)^2 s^{1,3} = 1{,}89 \left(\frac{198}{220 \cdot 0{,}8}\right)^2 \cdot 0{,}03^{1,3} = 0{,}025 \ вт;$$

$$P_{c1} = P_{cS1} + P_{cR1} = 7{,}4 + 0{,}025 = 7{,}425 \ вт.$$

Добавочный ток от потерь в стали прямой последовательности

$$I_{c1} = \frac{P_{c1}}{2E_1} = \frac{7{,}425}{2 \cdot 198} = 0{,}019 \ a.$$

Потери в стали от поля обратной последовательности при $E_2 = I_{A2} z'_{RA2} = 0{,}0515 \cdot 37{,}4 = 1{,}92$ *в*:

$$P_{cS2} = P'_{cS} \left(\frac{E_2}{U_{н} k_E}\right)^2 = 5{,}85 \left(\frac{1{,}92}{176}\right)^2 = 7 \cdot 10^{-4} \ вт;$$

$$P_{cR2} = P'_{cR} \left(\frac{E_2}{U_{н} k_E}\right)^2 s^{1,3} = 1{,}89 \left(\frac{1{,}92}{176}\right)^2 0{,}03^{1,3} = 2{,}36 \cdot 10^{-6} \ вт;$$

$$P_{c2} = P_{cS2} + P_{cR2} = 7 \cdot 10^{-4} \ вт.$$

Добавочный ток от потерь в стали обратной последовательности

$$I_{c2}=\frac{P_{c2}}{2E_2}=\frac{7\cdot 10^{-4}}{2\cdot 1{,}92}=0{,}0002\ a.$$

Токи статора с учетом потерь в стали

$$\dot I_{SA1}=(I'_{A1}+I_{c1})+jI''_{A1}=(0{,}163+0{,}019)-j0{,}238=0{,}182-j0{,}238;$$

$$\dot I_{SA2}=(I'_{A2}+I_{c2})+jI''_{A2}=(-0{,}0191+0{,}0002)+$$
$$+j0{,}0478=-0{,}0189+j0{,}0478;$$

$$\dot I_{SA}=\dot I_{SA1}+\dot I_{SA2}=0{,}182-j0{,}238-0{,}0189+j0{,}0478=0{,}163-j0{,}19;$$

$$I_{SA}=0{,}249\ a;$$

$$\dot I_{SB1}=j\frac{\dot I_{A1}}{k}+\frac{I_{c1}}{k}=j\frac{0{,}163-j0{,}238}{1{,}4}+\frac{0{,}019}{1{,}4}=0{,}184+j0{,}117;$$

$$\dot I_{SB2}=-j\frac{\dot I_{A2}}{k}+\frac{I_{c2}}{k}=$$

$$=-j\frac{-0{,}019+j0{,}048}{1{,}4}+\frac{0{,}0002}{1{,}4}=0{,}0344+j0{,}0136;$$

$$\dot I_{SB}=\dot I_{SB1}+\dot I_{SB2}=0{,}184+j0{,}117+0{,}0344+j0{,}0136=0{,}218+j0{,}131;$$

$$I_{SB}=0{,}247.$$

Плотности тока в главной и вспомогательной обмотках:

$$\Delta_A=\frac{I_{SA}}{s_A}=\frac{0{,}249}{0{,}0573}=4{,}35\ a/мм^2;$$

$$\Delta_B=\frac{I_{SB}}{s_B}=\frac{0{,}247}{0{,}0415}=5{,}96\ a/мм^2.$$

Полный ток сети

$$\dot I_S=\dot I_{SA}+\dot I_{SB}=0{,}163-j0{,}19+0{,}218+j0{,}131=0{,}381-j0{,}059;$$

$$I_S=0{,}386\ a.$$

Электромагнитная мощность

$$P_э=2I^2_{A1}r'_{RA1}-2I^2_{A2}r'_{RA2}=$$

$$=2\cdot 0{,}289^2\cdot 345-2\cdot 0{,}0575^2\cdot 19{,}2=57{,}5-0{,}102=57{,}4\ вт.$$

Полная механическая мощность на валу

$$P'_R=P_э(1-s)=57{,}4(1-0{,}03)=56{,}6\ вт.$$

Полезная механическая мощность на валу

$$P_R=P'_R-P_{мех}-P_д=56{,}6-3{,}5=53{,}1\ вт.$$

Полезный момент

$$M=\frac{P_R\cdot 10^5}{1{,}028n}=\frac{53{,}1\cdot 10^5}{1{,}028\cdot 2\,910}=1\,780\,Г\cdot см.$$

Потери в меди статора

$$P_{MS} = I_{SA}^2 r_{SA} + I_{SB}^2 r_{SB} =$$
$$= 0,249^2 \cdot 109,5 + 0,247^2 \cdot 212 = 19,74 \text{ вт}.$$

Потери в меди ротора

$$P_{MR} = 2I_{A1}^2 r'_{RA1} s + 2I_{A2}^2 r'_{RA2} (2 - s) =$$
$$= 2 \cdot 0,289^2 \cdot 345 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,052^2 \cdot 19,1 \cdot 0,97 = 1,83 \text{ вт}.$$

Потребляемая мощность

$$P_S = P'_R + P_{MS} + P_{MR} + P_с =$$
$$= 56,6 + 19,74 + 1,83 + 7,43 = 85,6 \text{ вт}.$$

Сумма потерь

$$\Sigma P = P_{MS} + P_{MR} + P_с + P_{мех} + P_д =$$
$$= 19,74 + 1,83 + 7,43 + 3,5 = 32,5 \text{ вт}.$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_S} = 1 - \frac{32,5}{85,6} = 0,62.$$

Коэффициент мощности главной фазы

$$\cos \varphi_A = \frac{I'_{SA}}{I_{SA}} = \frac{0,163}{0,249} = 0,655.$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы

$$\cos \varphi_B = \frac{I'_{SB}}{I_{SB}} = \frac{0,218}{0,247} = 0,88.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{I'_S}{I_S} = \frac{0,381}{0,386} = 0,987.$$

Напряжение на вспомогательной обмотке

$$\dot{U}_{B1} = \dot{I}_{SB1} (Z_{B1} - Z_C) =$$
$$= (0,184 + j0,117)(890 + j1\,250) = 18 + j334;$$
$$\dot{U}_{B2} = \dot{I}_{SB2} (Z_{B2} - Z_C) =$$
$$= (0,0344 + j0,0136)(252 + j149) = 6,63 + j8,54;$$
$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} = 18 + j334 + 6,63 + j8,54 = 24,6 + j342,5;$$
$$U_B = 344 \text{ в}.$$

Напряжение на конденсаторе

$$\dot{U}_C = \dot{I}_{SB} Z_C = -(0,218 + j0,131)\, j1\,590 = 208 - j347;$$
$$U_C = 405 \text{ в}.$$

Согласно приложению 8-1 выбираем рабочий конденсатор МБГЧ-2-500-2П.

На рис. 13-14 приведена векторная диаграмма конденсаторного двигателя в номинальном режиме. Округление величины рабочей емкости привело к некоторому нарушению условий кругового поля (временной сдвиг токов и напряжений в фазах A и B отклоняется от 90°, а отношение токов отличается от величины коэффициента трансформации).

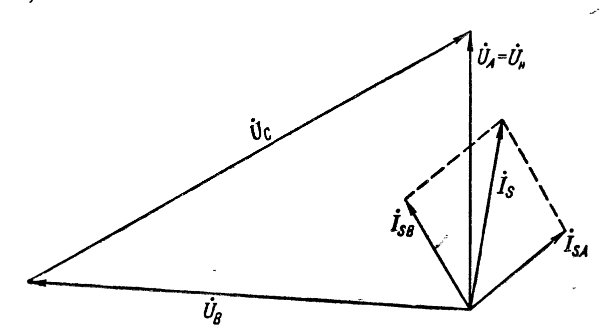


Рис. 13-14. Векторная диаграмма конденсаторного двигателя с постоянно включенной емкостью (номинальный режим).

Так как полученная степень эллиптичности невелика, то практически влиянием обратного поля в номинальном режиме можно пренебречь.

Расчет пускового режима

Параметры схемы замещения главной обмотки:

$$r'_{RA\text{к}} = \frac{\alpha\beta x_{mA}}{\alpha^2+1} = \frac{0,049\cdot 0,962\cdot 805}{0,049^2+1} = 38\ \text{ом};$$

$$x'_{RA\text{к}} = \beta x_{RA}\,\frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}}\alpha+1}{\alpha^2+1} =$$

$$= 0,962\cdot 32,9\,\frac{\frac{41}{32,9}\cdot 0,049+1}{0,049^2+1} = 33,6\ \text{ом};$$

$$Z_{A\text{к}} = (r_{SA}+r'_{RA\text{к}}) + j\,(x_{SA}+x'_{RA\text{к}}) =$$

$$= (109,5+38) + j\,(43,7+33,6) = 147,5 + j77,3;$$

$$Z_{B\text{к}} = k^2\,(r_{A\text{к}}+r_C) + j\,(k^2 x_{A\text{к}} - x_C) =$$

$$= 1,4^2\,(147,5+0) + j\,(1,4^2\cdot 77,3 - 1\,590) = 289 - j1\,438.$$

Токи прямой последовательности главной обмотки:

$$\dot{I}_{A\text{к}1} = \frac{\dot{U}_\text{н}}{2}\left(\frac{1}{Z_{A\text{к}}} - \frac{jk}{Z_{B\text{к}}}\right) =$$

$$= \frac{220}{2}\left(\frac{1}{147,5 + j77,3} - \frac{j1,4}{289 - j1\,438}\right) = 0,695 - j0,329;$$

$$I_{A\text{к}1} = 0,77 \ a;$$

$$\dot{I}_{A\text{к}2} = \frac{\dot{U}_\text{н}}{2}\left(\frac{1}{Z_{A\text{к}}} + \frac{jk}{Z_{B\text{к}}}\right) =$$

$$= \frac{220}{2}\left(\frac{1}{147,5 + j77,3} + \frac{j1,4}{289 - j1\,438}\right) = 0,481 - j0,287;$$

$$I_{A\text{к}2} = 0,56 \ a.$$

Полный ток главной обмотки

$$\dot{I}_{A\text{к}} = \dot{I}_{A\text{к}1} + \dot{I}_{A\text{к}2} = (0,695 - j0,329) +$$

$$+ (0,481 - j0,287) = 1,176 - j0,616;$$

$$I_{A\text{к}} = 1,33 \ a.$$

Полный ток вспомогательной обмотки

$$\dot{I}_{B\text{к}} = I'_{B\text{к}} + jI''_{B\text{к}} = j\,\frac{\dot{I}_{A\text{к}1}}{k} - j\,\frac{\dot{I}_{A\text{к}2}}{k} =$$

$$= j\,\frac{0,695 - j0,329}{1,4} - j\,\frac{0,481 - j0,287}{1,4} = 0,031 + j0,151 \ .$$

$$I_{B\text{к}} = 0,153 \ a.$$

Плотность тока в главной обмотке

$$\Delta_{A\text{к}} = \frac{I_{A\text{к}}}{s_A} = \frac{1,33}{0,0573} = 23,2 \ a/\text{мм}^2.$$

Коэффициент мощности главной фазы

$$\cos\varphi_{A\text{к}} = \frac{I'_{A\text{к}}}{I_{A\text{к}}} = \frac{1,176}{1,335} = 0{,}885.$$

Плотность тока во вспомогательной обмотке

$$\Delta_{B\text{к}} = \frac{I_{B\text{к}}}{s_B} = \frac{0,153}{0,0415} = 3,7 \ a/\text{мм}^2.$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы

$$\cos\varphi_{B\text{к}} = \frac{I'_{B\text{к}}}{I_{B\text{к}}} = \frac{0,031}{0,153} = 0{,}203.$$

Полный пусковой ток

$$\dot{I}_{к} = \dot{I}_{Aк} + \dot{I}_{Bк} = (1,176 - j0,616) + $$
$$+ (0,031 + j0,151) = 1,21 - j0,465;$$
$$I_{к} = 1,295 \ a.$$

Кратность пускового тока

$$i_{к} = \frac{I_{к}}{I_{н}} = \frac{1,295}{0,386} = 3,35.$$

Полный коэффициент мощности при пуске

$$\cos \varphi_{к} = \frac{I'_{к}}{I_{к}} = \frac{1,21}{1,295} = 0,935.$$

Электромагнитная мощность при пуске

$$P_{эк} = mr'_{RAк}(I^2_{Aк1} - I^2_{Aк2}) = 2 \cdot 40\,(0,77^2 - 0,56^2) = 22,5 \ вт.$$

Пусковой момент

$$M_{к} = \frac{P_{эк} \cdot 10^5}{1,028 n_{с}} = \frac{22,5 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 3\,000} = 730 \ Г \cdot см.$$

Кратность пускового момента

$$m_{к} = \frac{M_{к}}{M_{н}} = \frac{730}{1\,780} = 0,41.$$

Потребляемая мощность при пуске

$$P_{Sк} = U_{н} I_{к} \cos \varphi_{к} = 220 \cdot 1,295 \cdot 0,935 = 265 \ вт.$$

Напряжение на вспомогательной обмотке при пуске

$$\dot{U}_{Bк} \ \dot{I}_{Bк} \ (Z'_{Bк} - Z_{С}) = (0,031 + j0,151) \times$$
$$\times (268 - j1472 + j1590) = -9,45 + j44,16;$$
$$U_{Bк} = 45 \ в.$$

Напряжение на конденсаторе

$$\dot{U}_{С} = \dot{I}_{Bк} Z_{С} = -(0,031 + j0,151)\, j1590 = 242 - j39,3;$$
$$U_{С} = 246 \ в.$$

Таким, образом спроектирован конденсаторный двигатель с постоянно включенной емкостью, имеющий следующие номинальные данные:

$$P_{н} = 53,1 \ вт; \ n_{н} = 2\,910 \ об/мин; \ I_{н} = 0,386 \ a;$$
$$\cos \varphi = 0,987; \ \eta = 0,62.$$

Так как двигатель имеет только одну рабочую емкость $C_{р} = 2$ *мкф*, то пусковой момент его невелик Кратность пускового момента составляет $m_{к} = 0,41$, кратность пускового тока — $i_{к} = 3,35$.

13-4. РАСЧЕТ «СИНУСНОЙ» ОБМОТКИ

Наиболее сложным вопросом при расчете „синусной" обмотки является установление распределения проводников по пазам, обеспечивающее уничтожение третьей гармоники и значительное уменьшение пятой и седьмой гармоник в кривой н. с. В настоящем параграфе рассматриваются два примера, показывающие пути решения этой задачи. При построении графиков распределения проводников по пазам и н. с. используются относительные единицы. За единицу принимаются соответственно максимальные значения числа проводников в пазу для данной фазы ($u_{пxm} = 1$) и н. с., создаваемой проводниками этого паза. Результаты расчета обмоточных коэффициентов для первой, третьей, пятой и седьмой гармоник н. с. сведены в табл. 13-7, которая позволяет провести сравнение вариантов и дать их оценку.

Пример 1. Требуется спроектировать „синусную обмотку" для главной фазы статора, у которого полюсное деление

$$\tau_Z = \frac{Z_S}{2p} = 6 \text{ пазам.}$$

В данном примере полюсное деление не четное, кратное 3. Таким образом, для этого случая может быть найдено оптимальное распределение проводников (трапецеидальное) с верхним основанием, равным $\frac{\tau_Z}{3}$. Рассмотрим два случая распределения проводников по пазам:

а) когда третья гармоника в кривой н. с. не уничтожается полностью;
б) когда третья гармоника в кривой н. с. уничтожается полностью.

а) Принимаем закон распределения проводников по пазам для главной обмотки $\frac{u_{пx}}{u_{пxm}} = \varphi(x)$ в соответствии с рис. 13-15,*а*.

Из рисунка видно, что $\frac{\tau_Z}{3}$ пазов заполнена максимальным числом проводников.

Строим график н. с. (рис. 13-15,*б*), в котором начало отсчета принято при $x_0 = 0$, где $f(x_0) = 0$.

Находим по графику н. с. для ординат, указанных в табл. 2-3, следующие величины:

при $x_0 = 0$ $f(x_0) = 0$;

при $x_1 = \frac{p}{Z_S}\pi = \frac{\pi}{12}$

$$\Delta f_1(x_1) = \Delta f_1\left(\frac{\pi}{12}\right) = 1;$$

при $x_2 = \frac{3p}{Z_S}\pi = \frac{\pi}{4}$

$$\Delta f_2(x_2) = \Delta f_2\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0,5.$$

Покажем, что условие оптимальности для третьей гармоники не выполняется, так как

$$f(x_0) + \Sigma\Delta f(x_n)\cos 3x_n \neq -\Sigma\Delta f(x_n)\cos 3x_n;$$

$$0 + 1\cos 3\frac{\pi}{12} \neq -0,5\cos 3\frac{\pi}{4}.$$

Обмоточный коэффициент для ν-й гармоники

$$k_{0\nu} = \frac{f(x_0) + \Sigma \Delta f(x_n) \cos \nu x_n}{f_c(x)} =$$

$$= \frac{0 + 1 \cdot \cos \nu \frac{\pi}{12} + 0,5 \cdot \cos \nu \frac{\pi}{4}}{\frac{3}{2}} = \frac{2}{3} \cos \nu \frac{\pi}{12} +$$

$$+ \frac{1}{3} \cdot \cos \nu \frac{\pi}{4},$$

где $f_c(x) = \frac{3}{2}$ по рис. 13-15,*г*.

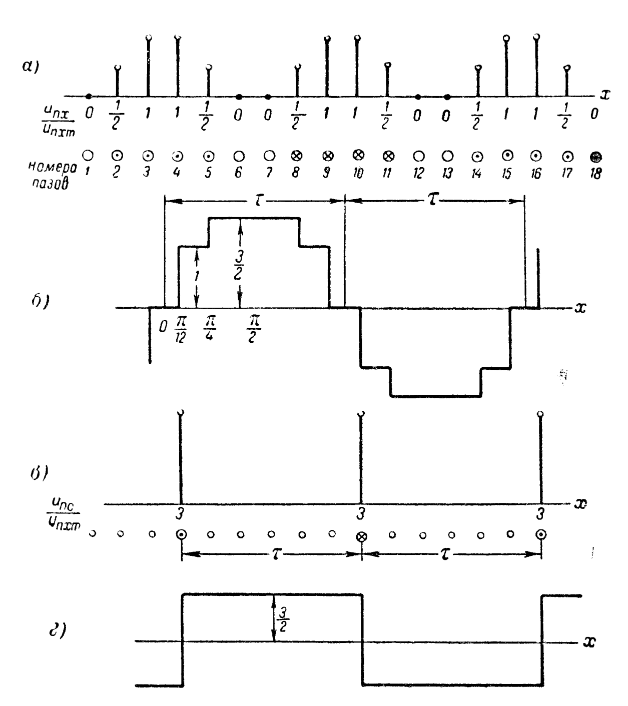


Рис. 13-15. К расчету синусной обмотки при $\tau_z = 6$ (вариант 1а).

а — распределение проводников по пазам $\frac{u_{пх}}{u_{пхm}} = \varphi(x)$; *б* — кривая н. с. $F_x = f(x)$; *в* — сосредоточенное распределение проводников; $\frac{u_{пс}}{u_{пхm}} = \varphi_c(x)$; *г* — н. с. при сосредоточенном распределении $F_c = f_c(x)$.

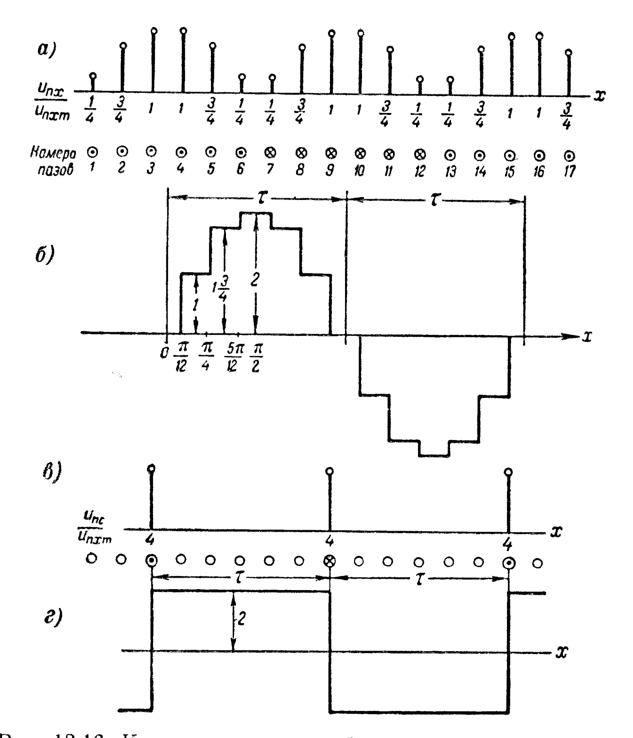


Рис. 13-16. К расчету синусной обмотки при $\tau_z = 6$ (оптимальный вариант 1б).

а — распределение проводников по пазам $\frac{u_{пс}}{u_{пxm}} = \varphi(x)$; *б* — кривая н. с. $F_x = f(x)$; *в* — сосредоточенное распределение проводников $\frac{u_{пс}}{u_{пxm}} = \varphi_с(x)$; *г* — н. с. при сосредоточенном распределении $F_с = f_с(x)$.

б) Выбираем оптимальный вариант распределения проводников $\frac{u_{пx}}{u_{пxm}} = \varphi(x)$ по пазам в соответствии с рис. 13-16,*а*.

Строим график н. с. (рис. 13-16,*б*), в котором начало отсчета принимаем при $x_0 = 0$, где $f(x_0) = 0$.

По графику н. с. находим:

при $x_1 = \frac{\pi}{12}$

$$\Delta f_1(x_1) = \Delta f_1\left(\frac{\pi}{12}\right) = 1;$$

при $x_2 = \frac{\pi}{4}$

$$\Delta f_2(x_2) = \Delta f_2\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0{,}75;$$

при $x_3 = \frac{5}{12}\pi$

$$\Delta f_3(x_3) = \Delta f_3\left(\frac{5}{12}\pi\right) = 0{,}25.$$

Условие оптимальности для третьей гармоники выполнено, так как

$$f(x_0) + \Sigma\Delta f(x_n)\cos 3x_n = -\Sigma\Delta f(x_n)\cos 3x_n;$$

$$0 + 1\cos 3\frac{\pi}{12} = -\left[0{,}75\cos 3\frac{\pi}{4} + 0{,}25\cos 3\frac{5}{12}\pi\right].$$

Обмоточный коэффициент для ν-й гармоники

$$k_{0\nu} = \frac{f(x_0) + \Sigma\Delta f(x_n)\cos\nu x_n}{f_c(x)} =$$

$$= \frac{0 + 1\cos\nu\frac{\pi}{12} + 0{,}75\cos\nu\frac{\pi}{4} + 0{,}25\cos\nu\frac{5\pi}{12}}{2} =$$

$$= \frac{3}{8}\cos\nu\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\cos\nu\frac{\pi}{12} + \frac{1}{8}\cos\nu\frac{5\pi}{12}.$$

Пример 2. Требуется спроектировать „синусную" обмотку для главной фазы статора, у которой полюсное деление

$$\tau_Z = \frac{Z_S}{2p} = 9 \text{ пазам.}$$

В данном примере полюсное деление нечетное, кратное 3. Для этого случая также может быть найдено оптимальное распределение проводников по пазам. Рассмотрим два случая (а и б) распределения проводников по пазам; в обоих случаях третья гармоника в кривой н. с. уничтожается полностью. Однако в первом случае (а) обмоточные коэффициенты пятой и седьмой гармоник значительно больше, чем во втором случае.

а) Принимаем закон распределения проводников по пазам для главной обмотки $\frac{u_{\text{п}x}}{u_{\text{п}xm}} = \varphi(x)$ в соответствии с рис. 13-17,*а*.

Строим график н. с (рис. 13-17,*б*), в котором начало отсчета принимаем при $x_0 = 0$, где $f(x_0) = \frac{1}{2}$.

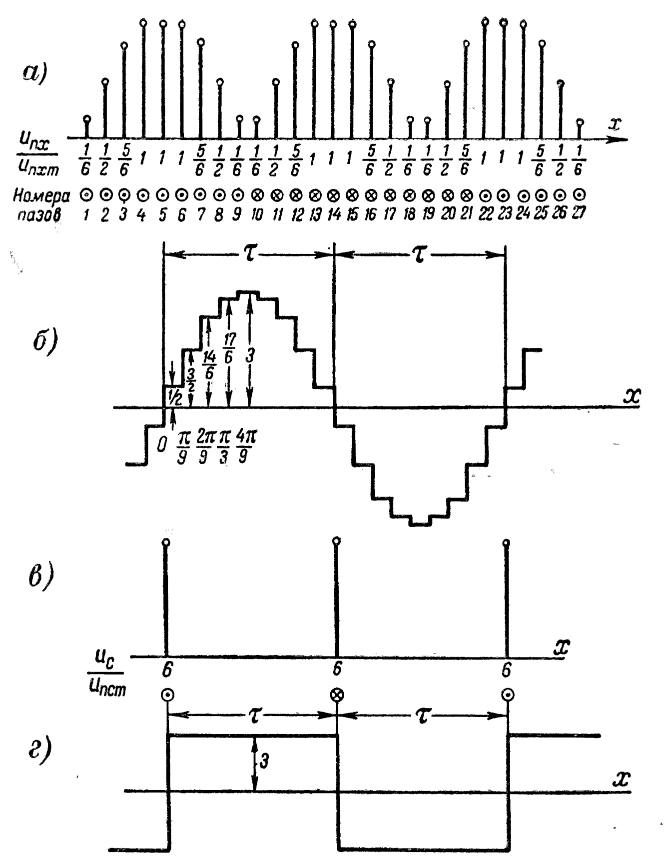


Рис. 13-17. К расчету синусной обмотки при $\tau_z = 9$ (вариант 2а).

а — распределение проводников по пазам $\frac{u_{\text{п}\,x}}{u_{\text{п}xm}} = \varphi(x)$; *б* — кривая н. с. $F_x = f(x)$; *в* — сосредоточенное распределение проводников $\frac{u_{\text{пс}}}{u_{\text{п}xm}} = \varphi_{\text{с}}(x)$. *г* — н. с. при сосредоточенном распределении $F_{\text{с}} = f_{\text{с}}(x)$.

Находим по графику н. с.

$$x_0 = 0;\ f(x_0) = \frac{1}{2};$$

$$x_1 = \frac{\pi}{9};\ \Delta f_1(x_1) = 1;$$

$$x_2 = \frac{2\pi}{9};\ \Delta f_2(x_2) = \frac{3}{4};$$

$$x_3=\frac{\pi}{3};\quad \Delta f_3(x_3)=\frac{1}{2};$$

$$x_4=\frac{4\pi}{9};\quad \Delta f_4(x_4)=\frac{1}{4}.$$

Условие оптимальности по третьей гармонике выполнено:

$$\frac{1}{2}+1\cdot\cos 3\,\frac{\pi}{9}=-\left[\frac{3}{4}\cos 3\,\frac{2\pi}{9}+\frac{1}{2}\cos 3\,\frac{\pi}{3}+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{4}\cos 3\,\frac{4\pi}{9}\right].$$

Обмоточный коэффициент ν-й гармоники равен:

$$k_{0\nu}=\frac{1}{6}+\frac{1}{3}\cos\nu\,\frac{\pi}{9}+\frac{1}{4}\cos\nu\,\frac{2\pi}{9}+$$
$$+\frac{1}{6}\cos\nu\,\frac{\pi}{3}+\frac{1}{12}\cos\nu\,\frac{4\pi}{9}.$$

б) Выбираем оптимальный закон распределения проводников по пазам для главной обмотки $\frac{u_{\text{п}x}}{u_{\text{п}xm}}=\varphi(x)$ в соответствии с рис. 13-18,*а*

По графику н. с. (рис. 13-18,*б*) находим:

при $x_0=0$ $\quad f(x_0)=\frac{1}{2}$;

при $x_1=\frac{\pi}{9}$ $\quad f(x_1)=1$;

при $x_2=\frac{2}{9}\pi$ $\quad f(x_2)=\frac{5}{6}$;

при $x_3=\frac{\pi}{3}$ $\quad f(x_3)=\frac{3}{6}$;

при $x_4=\frac{4}{9}\pi$ $\quad f(x_4)=\frac{1}{6}$.

Условие оптимальности по третьей гармонике выполнено:

$$\frac{1}{2}+1\cdot\cos 3\,\frac{\pi}{9}=-\left[\frac{5}{6}\cos 3\,\frac{2}{9}\pi+\right.$$
$$\left.+\frac{3}{6}\cos 3\,\frac{\pi}{3}+\frac{1}{6}\cos 3\,\frac{4\pi}{9}\right].$$

Обмоточный коэффициент для ν-й гармоники равен:

$$k_{0\nu}=\frac{1}{6}+\frac{1}{3}\cos\nu\,\frac{\pi}{9}+\frac{5}{18}\cos\nu\,\frac{2\pi}{9}+$$
$$+\frac{1}{6}\cos\nu\,\frac{\pi}{3}+\frac{1}{18}\cos\nu\,\frac{4\pi}{9}.$$

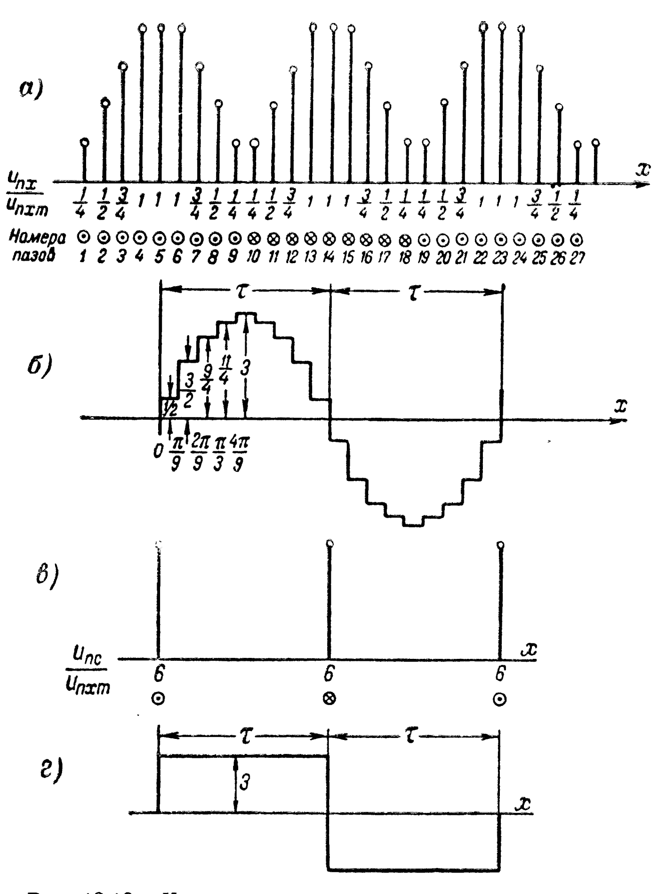


Рис. 13-18. К расчету синусной обмотки при $\tau_z = 9$ (оптимальный вариант 2б).

а — распределение проводников по пазам $\frac{u_{пx}}{u_{пxm}} \varphi(x)$; *б* — кривая н. с. $F_x = f(x)$; *в* — сосредоточенное распределение проводников $\frac{u_{пс}}{u_{пxm}} = \varphi_с(x)$; *г* — н. с. при сосредоточенном распределении $F_с = f_с(x)$.

В табл. 13-7 приводятся обмоточные коэффициенты для первой, третьей, пятой и седьмой гармоник. В первом примере расчета оптимальным является вариант 1б, в котором третья гармоника и кратные 3 уничтожены полностью, а пятая и седьмая гармоники сильно подавлены.

Таблица 13-7

Обмоточные коэффициенты „синусных" обмоток

№ вариантов	τ	Закон распределения проводников по пазам	Формула обмоточного коэффициента	Численные значения обмоточных коэффициентов			
				k_{01}	k_{03}	k_{05}	k_{07}
1а	6	Рис. 13-15,*а*	$k_{o\nu}=\frac{2}{3}\cos\nu\frac{\pi}{12}+\frac{1}{3}\cos\nu\frac{\pi}{4}$	0,88	0,235	0,063	0,063
1б	6	Рис. 13-16,*а*	$k_{o\nu}=\frac{3}{8}\cos\nu\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\cos\nu\frac{\pi}{12}+\frac{1}{8}\cos\nu\frac{5\pi}{12}$	0,78	0	0,0145	0,0145
2а	9	Рис. 13-17,*а*	$k_{o\nu}=\frac{1}{6}+\frac{1}{3}\cos\nu\frac{\pi}{9}+\frac{1}{4}\cos\nu\frac{2\pi}{9}+\frac{1}{6}\cos\nu\frac{\pi}{3}+\frac{1}{12}\cos\nu\frac{4\pi}{9}$	0,77	0	0,021	0,0382
2б	9	Рис. 13-18,*а*	$k_{o\nu}=\frac{1}{6}+\frac{1}{3}\cos\nu\frac{\pi}{9}+\frac{5}{18}\cos\nu\frac{2\pi}{9}+\frac{1}{6}\cos\nu\frac{\pi}{3}+\frac{1}{18}\cos\nu\frac{4\pi}{9}$	0,785	0	0,025	0,0094

Во втором примере предпочтение можно отдать варианту 2б, в котором обмоточный коэффициент для седьмой гармоники значительно ниже, чем в варианте 2а.

На основании рассмотренных примеров можно сделать вывод, что выполнение условий: 1(τ_Z — кратное 3 и 2) заполнение $\frac{\tau_Z}{3}$ пазов максимальным числом проводников главной фазы является недостаточным (пример 1а) для полного уничтожения третьей гармоники.

Уничтожение третьей гармоники и значительное ослабление пятой и седьмой гармоник без резкого уменьшения обмоточного коэффициента первой гармоники возможны при соответствующем подборе распределения проводников по пазам, что достигается путем расчета ряда вариантов.

13-5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЗАКРЫТОГО ОБДУВАЕМОГО АСИНХРОННОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ

Тепловой расчет проводится методом тепловой схемы замещения (см. § 12-2) для трехфазного двигателя единой серии АОЛ-11-2 мощностью $P_н = 180$ *вт* с номинальной скоростью $n_н = 2\,800$ *об/мин*.

Двигатель — закрытый обдуваемый.

Исходные данные — геометрические размеры в сантиметрах (рис. 12-1,*а* и 12-3):

$$D_а = 10{,}2;\ l_S = 4{,}6;\ D = 6;\ \delta = 0{,}025;$$

$$D_к = 12{,}37;\ l_{кор} = 19{,}6;\ D_{в1} = 11{,}6;$$

$$D_{в2} = 5{,}6;\ d_1 = 0{,}75;\ d_2 = 0{,}53;$$

$$h_{ZS} = 1{,}2;\ \delta' = 0{,}005.$$

Средняя ширина зубца статора $b_{Zср} = 0{,}35$; высота спинки статора $h_{aS} = 0{,}9$.

Обмотка статора выполнена проводом ПЭВ-2 диаметром $d_{гол} = 0{,}31$ *мм* ($d_{из} = 0{,}36$ *мм*).

Изоляция паза — электрокартон по 0,3 *мм* на сторону. Листы статора изолированы лаком; коэффициент заполнения пакета сталью $k_с = 0{,}93$. Число зубцов статора $Z_S = 24$.

Потери: в меди статора $P_{мS} = 42$ *вт*; в стали $P_с = 20{,}2$ *вт*; механические (без вентилятора) $P_{мех} = 5{,}5$ *вт*; в обмотке ротора $P_{MR} = 17{,}5$ *вт*; добавочные $P_{доб} = 0{,}9$ *вт*; сумма потерь $\Sigma P = 91{,}5$ *вт*.

Расчет тепловых сопротивлений см. табл. 12-1а.

Сопротивление изоляции проводников в пазу

$$n_1 = \frac{d_1 + d_2}{4d_{из}} = \frac{0{,}75 + 0{,}53}{4 \cdot 0{,}036} = 8{,}9;$$

$$n_2 = \frac{h_{ZS}}{2d_{из}} = \frac{1{,}2}{2 \cdot 0{,}036} = 17;$$

$$\delta_1' = \delta'(n_1 - 1) + \frac{\delta'}{2} = 0{,}005\,(8{,}9 - 1) + \frac{0{,}005}{2} = 0{,}042\ см;$$

$$\delta_2' = \delta'(n_2 - 1) + \frac{\delta'}{2} = 0{,}005\,(17 - 1) + \frac{0{,}005}{2} = 0{,}0825\ см;$$

$$\delta_э = \frac{\delta_1'\delta_2'}{2\delta_2' + \delta_1'} = \frac{0,042 \cdot 0,0825}{2 \cdot 0,0825 + 0,042} = 0,0167 \ см;$$

$$l_1 = lk_c = 4,6 \cdot 0,93 = 4,28 \ см;$$

$$П = d_1 + 2h_1 = 0,75 + 2 \cdot 1,2 = 3,15 \ см;$$

$$R_{из} = \frac{\delta_э}{Z_S l_1 П k_c} = \frac{0,0167}{24 \cdot 4,28 \cdot 3,15 \cdot 0,0004} = 0,129 \ град/вт.$$

Сопротивление пазовой изоляции

$$R_п = \frac{\delta_п}{Z_S П l_1 k_{t2}'} = \frac{0,03}{24 \cdot 4,28 \cdot 3,15 \cdot 0,0005} = 0,185 \ град/вт.$$

Сопротивление спинки статора

$$R_c = \frac{h_{aS}}{S_{aS} k_{Fe}} = \frac{0,9}{125 \cdot 0,58} = 0,0124 \ град/вт,$$

где

$$S_{aS} = \pi D_{a1} l_1 = \pi \cdot 9,3 \cdot 4,28 = 125 \ см^2;$$

$$D_{a1} = \frac{D_a + D + 2h_{ZS}}{2} = \frac{10,2 + 6 + 2 \cdot 1,2}{2} = 9,3 \ см.$$

Сопротивление зубцового слоя статора

$$R_Z = \frac{h_{ZS}}{S_Z k_{Fe}} = \frac{1,2}{35,9 \cdot 0,58} = 0,0577,$$

где

$$S_Z = Z_S b_{Z\,ср} l_1 = 24 \cdot 0,35 \cdot 4,28 = 35,9 \ см^2.$$

Сопротивление зубцового слоя для потерь меди статора

$$R_{ZM} = R_Z \frac{2h_{ZS}}{П} = 0,0577 \frac{2 \cdot 1,2}{3,15} = 0,044 \ град/вт.$$

Сопротивление зазора

$$R_\delta = \frac{\delta}{S_\delta k_{tb}} = \frac{0,025}{86,7 \cdot 0,00023} = 1,25 \ град/вт,$$

где $S_\delta = \pi D l = \pi \cdot 6,0 \cdot 4,6 = 86,7 \ см^2$.

Сопротивление ротора принимаем $R_R = 0,5 \ град/вт$.

Сопротивление подшипникового щита принимаем

$$R_щ = 0,001 \ град/вт.$$

Определение потенциалов „генераторов“ см. табл. 12-1б.

Потенциал „генератора потерь в стали статора“

$$V_c = 0,5P_c (R_c + R_Z) = 0,5 \cdot 20,2 (0,0124 + 0,0577) = 0,71^\circ \ C.$$

Потенциал „генератора потерь в меди статора“

$$V_{MS} = (P_{MS} + 0,5P_{доб}) R_{из} = (42 + 0,5 \cdot 0,9) \cdot 0,129 = 5,5^\circ \ C.$$

Потенциал „генератора потерь в роторе“

$$V_R = (P_{MR} + P_{мех} + 0,5P_{доб}) R_R = (17,5 + 5,5 + 0,5 \cdot 0,9) \cdot 0,5 = 11,7^\circ \ C.$$

Расчет температуры корпуса см. табл. 12-2.

Окружающая температура $t_{окр} = 25°$ С.

Приблизительное превышение температуры корпуса

$$\theta'_{ск} = \frac{\Sigma P}{S_{кор} k_s k_1} = \frac{91,5}{1\,000 \cdot 7,9 \cdot 1,97 \cdot 10^{-3}} \approx 6°\ С,$$

где

$$S_{кор} = \frac{\pi D^2_{кор}}{2} + \pi D_{кор}\, l_{кор} = \frac{\pi \cdot 12,37^2}{2} + \pi\, 12,37 \cdot 19,6 = 1\,000\ см^2;$$

$$k_1 = 0,56 \cdot 10^{-3} D^{0,5}_{кор} = 0,56 \cdot 10^{-3} \cdot 12,37^{0,5} = 1,97 \cdot 10^{-3}\ вт/см^2 \cdot град;$$

$$k_s = \frac{7,06}{k_{п1}} \cdot 10^{-4} n\,(D_{в1} - D_{в2}) =$$

$$= \frac{7,06}{1,5} \cdot 10^{-4} \cdot 2\,800\,(11,6 - 5,6) = 7,9;$$

$$k_{п1} = 1,5 \text{ для } 2p = 2.$$

Излучаемое тепло

$$P_л = 1,63 k_{изл} S_{кор} D^{0,5}_{кор} \left[\left(\frac{t_2}{1\,000}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{1\,000}\right)^4\right] =$$

$$= 1,63 \cdot 0,9 \cdot 1\,000 \cdot 12,37^{0,5} \left[\left(\frac{304}{1\,000}\right)^4 - \left(\frac{298}{1\,000}\right)^4\right] = 3,41\ вт,$$

где $k_{изл} = 0,9$ (серый цвет);

$$t_1 = 273 + t_{окр} = 273 + 25 = 298°\ К;$$

$$t_2 = t_1 + \theta'_{ск} = 298 + 6 = 304°\ К.$$

Тепло, рассеиваемое путем конвекции,

$$P_к = \Sigma P - P_л = 91,5 - 3,41 = 88,09.$$

Среднее превышение температуры корпуса

$$\theta_{ск} = \left(\frac{5\,360 k_{п2} P_к}{S_{кор} k_s D^{0,5}_{кор}}\right)^{0,8} = \left(\frac{5\,360 \cdot 0,87 \cdot 88,09}{1\,000 \cdot 7,9 \cdot 12,37^{0,5}}\right)^{0,8} = 8,65°\ С.$$

Так как $\theta_{ск} = 8,65$ не соответствует предварительно принятому значению $\theta'_{ск} = 6°$, то делаем второе приближение. Принимаем $\theta''_{ск} = 8,4°$; тогда излучаемое тепло может быть рассчитано при $t_1 = 298°$ С и $t_2 = t_1 + \theta''_{ск} = 298 + 8,4 = 306,4°$ С как

$$P_л = 1,63 k_{изл} S_{кор} D^{0,5}_{кор} \left[\left(\frac{t_2}{1\,000}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{1\,000}\right)^4\right] =$$

$$= 1,63 \cdot 0,9 \cdot 1\,000 \cdot 12,37^{0,5} \left[\left(\frac{306,4}{1\,000}\right)^4 - \left(\frac{298}{1\,000}\right)^4\right] = 4,65\ вт.$$

Тепло, рассеиваемое путем конвекции,

$$P_к = \Sigma P - P_л = 91{,}5 - 4{,}65 = 86{,}85 \ вт.$$

Среднее превышение температуры корпуса

$$\theta_{ск} = \left(\frac{5\,360 k_{п2} P_к}{S_{кор} k_s D_{кор}^{0,5}}\right)^{0,8} = \left(\frac{5\,360 \cdot 0{,}87 \cdot 86{,}85}{1\,000 \cdot 7{,}9 \cdot 12{,}37^{0,5}}\right)^{0,8} = 8{,}6^\circ\ С.$$

Средняя температура корпуса

$$t_{ск} = t_{окр} + \theta_{ск} = 25 + 8{,}6 = 33{,}6^\circ\ С.$$

Расчетная температура корпуса

$$t_{рк} = \theta_{рк} + t_{окр} = 9{,}8 + 25 = 34{,}8^\circ\ С,$$

где

$$\theta_{рк} = \theta_{ск} k_р = 8{,}6 \cdot 1{,}142 = 9{,}8^\circ\ С;$$

$$k_р = 0{,}906 \left(\frac{l_{кор}}{D_{кор}}\right)^{0,5} = 0{,}906 \left(\frac{19{,}6}{12{,}37}\right)^{0,5} = 1{,}142.$$

Расчет превышения температуры

Расчет превышения температуры различных участков машин ведется по схеме на рис. 13-19. Результаты расчета приводятся в табл. 13-8, которая соответствует табл. 12-3 (см. § 12-2), за исключением точек *6* и *7*, так как машина обдуваемая.

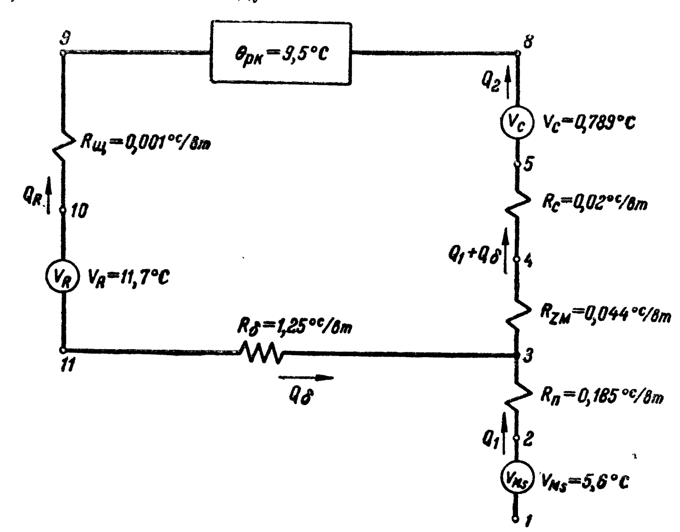


Рис. 13-19. Тепловая схема замещения двигателя АОЛ 11/2.

Таблица 13-8

Расчет превышений температуры для двигателя АОЛ 11/2

№ точки на тепловой схеме	Название участка	Первое приближение	Второе приближение
8 и 9	Наружная поверхность корпуса	$V_8=V_9=\theta_{рк}=9,5°$ C	$V_8=V_9=\theta_{рк}=9,5°$ C; $Q_\delta=\frac{-(V'_3-V'_{11})}{R_\delta}=\frac{-(13-21,2)}{1,25}=9,35$
3	Наружная поверхность зубцов	$V'_3=V_8+V_c+Q'(R_c+R_{мZ})=9,5+$ $+0,784+42,45(0,02+0,044)=13°$ C	$V_3=V_8+V_c+(Q_1+Q_\delta)(R_c+R_{ZM})=$ $=9,5+0,784+(42,45+9,35)(0,02+$ $+0,044)=13,6°$ C
2	Внешняя часть проводников паза статора	$V'_2=V'_3+Q'_1R_п=13+42,45\cdot 0,0185=$ $=20,85°$ C	$V_2=V_3+Q_1R_п=13,6+42,45\cdot 0,185=$ $=21,45°$ C
1	Проводники в центре паза	$V'_1=V_2+V_{мS}=20,85+5,6=26,45°$ C	$V_1=V_2+V_{мS}=21,45+5,6=27,05°$ C $\theta_A=V_1$
10	Внутренняя поверхность щита	$V'_{10}=V_9+Q'_RR_щ=9,5+23,45\cdot 0,001=$ $=9,52°$ C	$Q_R=Q'_R-Q_\delta=23,45-9,35=14,1$; $V_{10}=V_9+Q_RR_щ=9,5+14,1\cdot 0,001=$ $=9,65°$ C
11	Наружная поверхность ротора	$V'_{11}=V'_{10}+V_R=9,52+11,7=21,22°$ C	$V_{11}=V_{10}+V_R=9,51+11,7=21,21°$ C

Предварительно рассчитываются тепловые потоки на различных участках схемы:

$$Q_1' = Q_1 = P_{мз} + 0{,}5P_д = 42 + 0{,}5 \cdot 0{,}9 = 42{,}45 \ вт;$$

$$Q_2' = Q_1' + P_с = 42{,}45 + 20{,}2 = 62{,}65 \ вт;$$

$$Q_R' = P_{мR} + 0{,}5P_д + P_{мех} = 17{,}5 + 0{,}5 \cdot 0{,}9 + 5{,}5 = 23{,}45 \ вт.$$

Средняя температура обмотки может быть найдена по среднему превышению температуры обмотки:

$$t_{об} = \Theta_{cS} + t_{окр} = 29{,}8 + 25 = 54{,}8° \text{ C},$$

где

$$\Theta_{cS} = 1{,}1\theta_1 = 1{,}1 \cdot 27{,}05 = 29{,}8° \text{ C}.$$

По опытным данным средняя температура обмотки для двигателя АОЛ 11/2 составляет $t_{об} = 56{,}4°$ C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. и Сергеев П. С., Проектирование электрических машин, ГЭИ, 1956.
2. Петров Г. Н. и др., Электрические машины, ч. 1, ГЭИ, 1940.
3. Постников И. М., Проектирование электрических машин, 1952.
4. Костенко М. П., Электрические машины (специальная часть), ГЭИ, 1949.
5. Лившиц М., Электрические машины, т. III, ГЭИ, 1936.
6. Рихтер Р., Электрические машины, т. IV, ОНТИ, 1939.
7. Алексеев А. Е., Конструирование электрических машин, ГЭИ, 1959.
8. Чечет Ю. С., Номографический метод построения рабочих характеристик однофазных асинхронных микродвигателей с расщепленной фазой, «Электричество», 1948, № 7.
9. Чечет Ю. С., Выбор основных размеров и параметров однофазных асинхронных микродвигателей, «Электричество», 1948, № 11.
10. Чечет Ю. С., Расчет вспомогательной обмотки однофазных асинхронных микродвигателей, «Электричество», 1949, № 2.
11. Чечет Ю. С., Влияние третьей пространственной гармоники магнитного потока на пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя, работающего от сети однофазного тока, «Электричество», 1950, № 3.
12. Чечет Ю. С., Универсальный асинхрончый микродвигатель, «Электричество», 1950, № 10.
13. Чечет Ю. С., Управляемый асинхронный микродвигатель с полым ротором, ГЭИ, 1954.
14. Лопухина Е. М. и Сомихина Г. С., Формуляр расчета асинхронных микродвигателей, МЭИ, 1956.
15. Сомихина Г. С. и Павлов К. В., Однофазные распределенные синусные обмотки асинхронных микродвигателей, «Известия высших учебных заведений», 1958, № 11.

16. Суйский П. А., Исследование нагрева асинхронных короткозамкнутых двигателей серий А и АО мощностью 0,6—100 *квт* при продолжительном режиме работы, «Электричество», 1958, № 9.

17. Лопухина Е. М., Ивонин Е. И. и Мушкетов Н. А., Тепловой расчет закрытых электрических микродвигателей, «Известия высших учебных заведений», 1959, № 12.

18. Камень И. М., Определение пусковых характеристик однофазных асинхронных двигателей с пусковой обмоткой, «Электричество», 1952, № 8.

19. Сорокер Т. Г., Многофазный асинхронный двигатель (поверочный расчет), ЦБТИ, 1959.

20. Сорокер Т. Г., Дифференциальное рассеяние многофазных асинхронных двигателей, «Вестник электропромышленности», 1956, № 6.

21. Лопухина Е. М., Сомихина Г. С., Арешян Г. Л. и Юферов Ф. М., под общей редакцией Ю. С. Чечета, Исследование электрических микромашин, МЭИ, 1953.

22. Нюрнберг В., Испытание электрических машин, ГЭИ, 1959.

23. Грушкович Л., Дифференциальное рассеяние в микродвигателях, Диссертация, МЭИ, 1958.

24. Юферов Ф. М., Электрические двигатели автоматических устройств, Госэнергоиздат, 1959.

25. Бытовые электрические стиральные машины, ЦБТИ, 1959.

26. Захарян В. М., Малогабаритные асинхронные и коллекторные электродвигатели малой мощности для встраивания в механизмы и приборы, ЦИНТИ, 1959.

27. ГОСТ 6435-52. Электродвигатели мощностью 5—600 *вт* (ряд мощностей).

28. ГОСТ 9212-56. Электродвигатели трехфазные с короткозамкнутым ротором мощностью 10—600 *вт* (технические требования).

29. Каталог 1641 МЭП СССР, Малые электродвигатели (единая серия), 1954.

30. Чечет Ю. С., Астахов Н. В., Завриев А. С., Сомихина Г. С и Юферов Ф. М., Электродвигатели для медицинского привода, „Материалы по обмену опытом и научными достижениями в медицинской промышленности“, ВНИИ МИ и о, 5(24), 1957.

31. Астахов Н. В., Завриев А. С., Сомихина Г. С. и Юферов Ф. М., Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором для медицинской аппаратуры, „Материалы по обмену опытом и научными достижениями в медицинской промышленности“, ВНИИ МИ и о, 6(25), 1957.

32. Kron G., Equivalent circuits of electric machinery, N. Y, Wiley, 1951.

33. Stepina Jaroslav, Jednofazove Indukcni Motory, Praha, 1957.

34. Ciganek Ladislav, Stavba elektricych Stroju, Praha, 1958.

35 Veinott G., Fractional horsepower electric motors, N. Y., 1948.

36. Veinott G., Starting windings for single phase induction motors, Trans. AIEE, 1944.

37. Veinott G., Theory and design of small induction motors, N. J., McGraw-Hill, 1959.

38. Kotnik R. L., An equivalent thermal circuit for nonventilated induction motors, Trans. AIEE, 1954, v 73, part III, p. 1604—1608.

39. Kuhlmann, John H., Design of Electrical Apparatus, N. Y., Wiley, 1950.
40. Suhr F. W., Symmetrical components as applied to the single-phase induction motor, Electrical Engineering, 1945. v.64, N 9.
41. Trickey P. H., Performance calculations on capacitor motors, the revolving field theory, Trans. AIEE, 1941, p 73—76.
42. Trickey P. H., The equal volt-ampere method of designing capacitor motors, Trans. AIEE, 1941, p. 990.
43. Trickey P. H., Output of induction motors depends on total active material, Product Engineering, December 1946.
44. Lloyd T. C., Some aspects of electric motor design-polyphase induction motor design to meet fixed specifications, Trans. AIEE, 1944, p. 14—20.
45. Lloyd T. C. and Karr J. H., Design of starting windings for split-phase motors, Trans. AIEE, 1944, p. 9—13.
46. Lloyd T. C. and Stone H. B., Some aspects of polyphase motor design, The design and properties of the magnetic circuit, Trans. AIEE, 1946, p. 812—818.
47. Lloyd T. C. and Chang SSL, A design method for capacitor motors, Trans. AIEE, 1947, p. 652—659.
48. Chang SSL, A design method of capacitor start motors. Trans. AIEE, 1947, p. 1369—1374.
49 McFarland, Turn ratio of the capacitor motor, Trans. AIEE, 1943, p. 892—898.
50. Himebrook F. S., Single-phase induction motor performance calculations, Trans. AIEE, 1941, p. 55—58.
51. Crouse C. H., A method of total design as applied to the polyphase induction motors, Trans. AIEE, August 1950.
52. Slemen, Equivalent circuits for single-phase motors, Power Apparatus and Systems, 1956, № 2.
53. Covo A. and Lingo L. E., Graphical determination of starting performance of capacitor motors, AIEE, Power Apparatus and Systems, February, 1957, p. 1309—1312.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Зависимость $H=f(B)$ для листовой электротехнической стали Э11 и Э12

$H=f(B)$

B	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
4 000	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67
5 000	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
6 000	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
7 000	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
8 000	3,18	3,24	3,3	3,37	3,44	3,52	3,6	3,69	3,78	3,87
9 000	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,8	4,91
10 000	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,7	5,85	6,0	6,15	6,31
11 000	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,0	8,21
12 000	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
13 000	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
14 000	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
15 000	25,0	26,4	27,9	29,5	31,0	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2
16 000	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66,0	69,8	73,7
17 000	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122
18 000	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
19 000	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
20 000	310	325	346	365	390	420	455	495	545	595
21 000	655	725	800	880	960	1 040	1 120	1 200	1 280	1 360
22 000	1 440	1 520	1 600	1 680	1 760	1 840	1 920	2 000	2 080	2 160
23 000	2 244	2 320	2 400	2 480	2 560	2 640	2 720	2 800	2 880	2 960
24 000	3 040	3 120	3 200	3 280	3 360	3 440	3 520	3 600	3 680	3 760
25 000	3 840	3 920	4 000	4 080	4 160	4 240	4 320	4 400	4 480	4 560

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Номинальные диаметры d, сечения S и веса G 1 *км* круглой обмоточной меди

d, *мм*	S, *мм*²	G, *кг*	d, *мм*	S, *мм*²	G, *кг*	d, *мм*	S, *мм*²	G, *кг*	d, *мм*	S, *мм*²	G, *кг*
0,05	0,00196	0,01746	0,41	0.132	1,173	0,18	0,0255	0,226	0,72	0,407	3,62
0,06	0,00283	0,0252	0,44	0,1521	1,352	0,19	0,0284	0,252	0,74	0,430	3,82
0,07	0,00385	0,0342	0,47	0,1735	1,542	0,20	0.0314	0,279	0,77	0,466	4,14
0,08	0,00503	0,0447	0,49	0,1886	1,676	0 21	0,0346	0,308	0,80	0,503	4,47
0,09	0,00636	0,0566	0,51	0,204	1,816	0.23	0,0415	0,369	0,83	0,541	4,81
0,1	0,00785	0,0698	0.53	0,221	1,961	0,25	0,0491	0,436	0,86	0,581	5,16
0,11	0,00950	0,0845	0,55	0.238	2,11	0,27	0,0573	0,509	0,90	0,636	5,66
0,12	0,01131	0,1005	0,57	0,255	2,27	0,29	0,0661	0,587	0,93	0,679	6,04
0,13	0,01327	0,1180	0,59	0,273	2,43	0,31	0,0755	0,671	0,96	0,724	6,43
0,14	0,01539	0,1368	0,62	0,302	2,68	0,33	0,0855	0,760	1,00	0,785	6,98
0,15	0,01767	0,1571	0,64	0,322	2,86	0,35	0,0962	0,855	1,04	0,849	7,55
0,16	0,0201	0,1788	0,67	0,353	3,13	0,38	0,1134	1,008	1,08	0 916	8 14
0,17	0,0227	0,202	0,69	0,374	3,32						

Толщины изоляции обмоточных проводов, *мм*

Марка проводов	Диаметр проволоки, *мм*								
	0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,27—0,29	0,31—0,35	0,38÷0,49	0,51—0,69	0,72—0,96	1,00—1,45
ПЭЛ	0,015	0,02	0,025	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08
ПЭЛУ	0,025	0,035	0 04	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,10
ПЭЛШО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,110	0,115	0,125	0,135
ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,110	0,115	0,125	0,135
ПБО	—	—	0,1	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21
	Диаметр проволоки, *мм*								
	0,02—0,06	0,10—0,14	0,15—0,21	0,23—0,33	0,35—0,49	0,51—0,59	0,64—0,69	0,74—0,93	1,00—1,68
ПЭВ-1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08
ПЭВ-2	—	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Изоляция для всыпной обмотки статора (нормальная изоляция класса А) двигателей единой серии. Напряжение до 500 *в*

Изоляция пазовой части обмотки

Наименование	Материал и технология обработки	Двусторонняя толщина пазовой изоляции, *мм*		
		0 габарит	1 габарит	2 габарит
Коробка пазовая	Два слоя пленкокартона предварительно согнуть соответственно форме паза (2×0,17)	0,68		
Крышка пазовая	Один слой пленкокартона предварительно согнуть соответственно форме паза (1×0,3)	0,6		
Клин пазовый	Клинья из твердого дерева (береза пропитанная) сушить согласно производственной инструкции	h=1,5	h=2,0	h=2,0

Изоляция лобовых частей обмотки

Прокладка изоляционная	1 слой электрокартона толщиной 1,5, *мм*
Прокладка междуфазная	Полотно суровое проложить между катушками соседних фаз
Бандаж	Соединения катушечных групп изолировать линоксиновыми трубками и взять под бандаж

Статор с обмоткой	Статор с обмоткой высушить в печи, 2 раза пропитать в лаке печной сушки № 458 или 447. Сушить в печи. Лобовые части обмотки 1 раз пульверизировать фенольным лаком, сушить на воздухе

Провода ПЭЛШО или ПЭЛБО. Предельный перегрев обмотки 65° С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

К расчету потерь в стали ротора

s	$s^{1.3}$	$2 - s$	$(2 - s)^{1,3}$
0,01	0,00025	1,99	2,444
0,02	0,00081	1,98	2,432
0,03	0,00105	1,97	2,413
0,04	0,00151	1,96	2,399
0,05	0,00195	1,95	2,382
0,06	0,00257	1,94	2,366
0,07	0,00316	1,93	2,345
0,08	0,00376	1,92	2,333
0,09	0,00437	1,91	2,317
0,1	0,05012	1,9	2,301
0,2	0,16220	1,8	2,148
0,4	0,30410	1,6	1,845
0,6	0,51520	1,4	1,549
0,8	0,74990	1,2	1,268

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Обмоточные данные микродвигателей единой серии нулевого, первого, второго и третьего габаритов

В приложении 6-1—6-9 даны технические и обмоточные данные и основные размеры двигателей единой серии малой мощности (микродвигателей). Серия включает четыре типа двигателей:

АОЛ — трехфазные асинхронные двигатели;
АОЛБ — однофазные асинхронные двигатели с пусковым сопротивлением;
АОЛГ — однофазные асинхронные двигатели с пусковой емкостью;
АОЛД — однофазные конденсаторные двигатели с рабочей и пусковой емкостью.

Все двигатели выполнены на четырех различных диаметрах и двух длинах. В обозначении типа двигателя первая цифра означает диаметр, вторая — длину, а знаменатель — число полюсов.

Пакеты статора и ротора изготовлены из стали марки Э11, листы статора лакированы. Провод обмотки статора ПЭЛШО или ПЭЛБО. В машинах нулевого габарита применен провод ПЭЛШО, третьего габарита—ПЭЛБО. Алюминий для заливки ротора—марки А1.

Технические и обмоточные данные трехфазных асинхронных

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу $P_н$, *вт*	Напряжение $U_н$, *в*	При номинальной нагрузке				$\frac{M_{макс}}{M_н}$	Пусковые характеристики	
			Ток $I_н$, *а*	К. п. д. η, %	cos φ	Скорость вращения *n*, *об/мин*		$\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$
АОЛ 011/2	80	220	0,43	58	0,84	2 760	1,7	4	1,9
		380	0,25						
		127	0,75						
		220	0,43						
АОЛ 011/4	50	220	0,49	43	0,62	1 390	1,7	3	1,3
		380	0,28						
		127	0,85						
		220	0,49						
АОЛ 012/2	120	220	0,59	64	0,84	2 790	1,8	4	1,6
		380	0,34						
		127	1,0						
		220	0,59						
АОЛ 012/4	80	220	0,59	55	0,65	1 390	1,8	3	1,6
		380	0,34						
		127	1,0						
		220	0,59						

микродвигателей единой серии нулевого габарита

Обмотка статора									
Размеры провода d (гол/изол) *мм*	Число проводников в пазу $u_п$	Тип обмотки	Соединение фаз	Коэффициент заполнения паза $k_з$	Число эффективных проводников последовательно на фазу N эА	Сопротивление фазы при 15° С r_s, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_м$, *кг*	Длина проводников, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*
0,21/0,289	337	Однослойная обмотка	Δ / Y	0,65	2 022	162	0,154	0,3 / 0,31	0,116
0,29/0,38	195		Δ / Y	0,67	1 170	49		0,31 / 0,32	
0,19/0,25	460		Δ / Y	0,685	2 760	209	0,120	0,25 / 0,26	0,082
0,25/0,325	266		Δ / Y	0,665	1 596	70		0,25 / 0,26	
0,25/0,325	260		Δ / Y	0,655	1 560	95	0,158	0,35 / 0,36	0,116
0,35/0,44	150		Δ / Y	0,69	900	28		0,39 / 0,40	
0,21/0,285	350		Δ / Y	0,675	2 100	144	0,134	0,27 / 0,28	0,082
0,29/0,38	202		Δ / Y	0,695	1 212	44		0,29 / 0,30	

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу $P_н$, *вт*	Напряжение $U_н$, *в*	При номинальной нагрузке			
			Ток $I_н$, *а*	К. п. д. η, %	cos φ	Скорость вращения *n*, *об/мин*
АОЛБО 11/2	30	380 220 127	0,28 0,49 0,85	41	0,68	2 880
АОЛГО 11/2	30	380 220 127	0,28 0,49 0,85	41	0,68	2 880
АОЛДО 11/2	50	220 127	0,48 0,85	48	0,98	2 880
АОЛБО 11/4	18	380 220 127	0,32 0,55 0,95	22	0,68	1 370
АОЛГО 11/4	18	380 220 127	0,32 0,55 0,95	22	0,68	1 370
АОЛДО 11/4	30	220 127	0,47 0,80	33	0,88	1 430
АОЛБО 12/2	50	380 220 127	0,39 0,68 1,18	48	0,70	2 880
АОЛГО 12/2	50	380 220 127	0,39 0,68 1,18	48	0,70	2 880
АОЛДО 12/2	80	220 127	0,68 1,2	54	0,98	2 880
АОЛБО 12/4	30	380 220 127	0,42 0,72 1,25	28	0,68	1 390
АОЛГО 12/4	30	380 220 127	0,42 0,72 1,25	28	0,68	1 390
АОЛДО 12/4	50	220 127	0,65 1,10	40	0,58	1 430

микродвигателей единой серии нулевого габарита

$\frac{M_{макс}}{M_н}$	Пусковые характеристики		Конденсатор			
			Пусковой		Рабочий	
	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$C_п$, *мкф*	U_C, *в*	$C_р$, *мкф*	U_C, *в*
1,9	8	1	—	—	—	—
1,9	4	2	4 10 30	520 300 175	— — —	— — —
1,6	4	1	8 25	300 175	3 10	500 290
1,5	6,5	1,2	—	—	—	—
1,5	3	2,2	3 7 20	520 300 175	— — —	— — —
1,6	2,5	1	5 15	300 175	2,5 8	500 290
1,9	8	1	—	—	—	—
1,9	4	2	5 15 40	520 300 175	— — —	— — —
1,6	4	1	10 30	300 175	5 18	500 290
1,6	6,5	1,2	—	—	—	—
1,6	3	2,2	3 8 25	520 300 175	— — —	— — —
1,6	2,5	1	4 10	300 175	3 8	500 290

Тип электродвигателя	Обмотка				
	Главная				
	Число пазов Z_A	Размеры провода d, *мм*	Число проводников в пазу $u_{пA}$	Шаг по пазам	Тип обмотки
АОЛБО 11/2	12	0,21/0,285 0,29/0,38 0,21/0,285	346 200 345/115	—	Однослойная
АОЛГО 11/2	12	0,21/0,285 0,29/0,38 0,21/0,285	346 200 345/115	—	
АОЛДО 11/2	8	0,25/0,325 0,33/0,42	260 150	—	
АОЛБО 11/4	12	0,17/0,23 0,23/0,305 0,31/0,4	2×242 2×140 2×81	1—5	Двухслойная
АОЛГО 11/4	12	0,17/0,23 0,23/0,305 0,31/0,4	2×242 2×140 2×81	1—5	
АОЛДО 11/4	8	0,21/0,285 0,27/0,36	364 205	—	Однослойная
АОЛБО 12/2	12	0,23/0,325 0,33/0,42 0,31/0,4	259 150 174/87	—	
АОЛГО 12/2	12	0,23/0,325 0,33/0,42 0,31/0,4	259 150 174/87	—	
АОЛДО 12/2	8	0,29/0,38 0,27/0,36	190 220/110	—	
АОЛБО 12/4	12	0,2/0,275 0,27/0,36 0,25/0,325	2×176 2×102 2×118/59	1—5	Двухслойная
АОЛГО 12/4	12	0,2/0,275 0,27/0,36 0,25/0,325	2×176 2×102 2×118/59	1—5	
АОЛДО 12/4	8	0,25/0,325 0,33/0,42	260 150	—	Однослойная

статора

фаза

Коэффициент заполнения паза $k_{зап}$	Число эффективных проводников последовательно на фазу $N_{эA}$	Сопротивление фазы при 15° С r_{SA}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_м$ (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть $l_л$, *м*
0,67 0,685 0,67	4 152 2 400 1 380	288 87 31,8	0,134	0,18/0,185 0,2/0,206 0,18/0,185	0,096
0,67 0,685 0,67	4 152 2 400 1 380	288 87 31,8	0,134	0,18/0,185 0,2/0,206 0,18/0,185	0,096
0,655 0,635	2 080 1 200	112 372	0,148	0,135/0,14 0,135/0,14	0,11
0,665 0,68 0,675	5 808 3 360 1 944	505 162 51	0,110	0,13/0,134 0,134/0,138 0,144/0,149	0,072
0,635 0,68 0,675	5 808 3 360 1 944	505 162 51	0,110	0,13/0,134 0,134/0,138 0,144/0,149	0,072
0,68 0,633	2 832 1 640	170 59,5	0,116	0,091/0,10 0,1/0,11	0,078
0,65 0,63 0,665	3 108 1 800 1 044	168 55,5 18,2	0,148	0,21/0,216 0,21/0,216 0,21/0,216	0,096
0,65 0,63 0,665	3 108 1 800 1 044	168 55,5 18,2	0,148	0,21/0,216 0,21/0,216 0,21/0,216	0,096
0,655 0,675	1 520 880	66,5 22,2	0,162	0,145/0,149 0,146/0,15	0,11
0,69 0,685 0,65	4 224 2 448 1 416	298 95 32	0,124	0,147/0,152 0,154/0,159 0,154/0,159	0,072
0,69 0,685 0,65	4 224 2 448 1 416	298 95 32	0,124	0,147/0,152 0,154/0,159 0,154/0,159	0,072
0,65 0,63	2 080 1 200	98,0 32,7	0,130	0,12/0,15 0,12/0,15	0,078

Обмотка

Вспомогатель

Тип электродвигателя	Число пазов Z_B	Размеры провода d (гол./изол.), *мм*	Число проводников в пазу $u_{пВ}$		Шаг по пазам
			эфф.	полн.	
АОЛБО 11/2	6	0,2/0,275 0,27/0,36 0,25/0,325	192 111 128/64	382 221 256/128	—
АОЛГО 11/2	6	0,14/0,2 0,19/0,25 0,25/0,325	— — —	710 412 237	— —
АОЛДО 11/2	8	0,23/0,305 0,31/0,4	— —	300 173	—
АОЛБО 11/4	6	0,19/0,25 0,25/0,325 0,33/0,42	2×95 2×55 2×32	2×213 2×123 2×72	1—5
АОЛГО 11/4	6	0,12/0,18 0,17/0,23 0,23/0,305	— — —	2×400 2×232 2×134	1—5
АОЛДО 11/4	8	0,19/0,25 0,25/0,325	— —	466 270	—
АОЛБО 12/2	6	0,23/0,305 0,31/0,4 0,29/0,38	143 83 94/47	303 175 198/99	—
АОЛГО 12/2	6	0,17/0,23 0,21/0,285 0,31/0,4	— — —	543 314 181	—
АОЛДО 12/2	8	0,27/0,36 0,21/0,285	— —	205 354/118	—
АОЛБО 12/4	6	0,2/0,275 0,27/0,36 0,25/0,325	2×78 2×45 2×52/26	2×178 2×101 2×116/58	1—5
АОЛГО 12/4	6	0,14/0,2 0,19/0,26 0,14/0,2	— — —	2×318 2×184 2×318/106	1—5
АОЛДО 12/4	8	0,20/0,27 0,27/0,36	— —	382 220	—

статора

ная фаза

Тип обмотки	Коэффициент заполнения паза $k_{зап}$	Число эффективных проводников последовательно на фазу $N_{эB}$	Сопротивление фазы при 15° С, r_{SB}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср.}$ *м*	Вес меди $G_м$ (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*
Однослойная	0,685 0,68 0,645	1 152 668 384	203 64 21,7	0,154	0,1/0,103 0,105/0,108 0,104/0,107	0,116
	0,675 0,615 0,6	1 260 2 472 1 422	770 242 30	0,154	0,09/0,093 0,096/0,099 0,096/0,099	0,116
	0,665 0,655	2 400 1 334	153 48,5	0,148	0,132/0,135 0,138/0,142	0,11
Двухслойная	0,69 0,675 0,66	1 140 660 384	177 69,0 20,0	0,110	0,071/0,073 0,071/0,073 0,072/0,074	0,072
	0,670 0,635 0 64	4 800 2 784 1 608	825 234 76	0,110	0,053/0,055 0,06/0,062 0,065/0,067	0,072
Однослойная	0,69 0,685	3 726 2 160	272 92	0,115	0,09/0,093 0,11/0,113	0,078
	0,57 0,655 0,675	858 498 282	132 42 13,5	0,168	0,114/0,118 0,12/0,15 0,118/0,12	0,116
	0,685 0,605 0,685	3 253 1 884 1 056	432 165 43,5	0,168	0,111/0,115 0,098/0,101 0,123/0,127	0,116
	0,635 0,685	1 640 944	88 26,3	0,162	0,135/0,139 0,142/0,146	0,11
Двухслойная	0,69 0,68 0,636	936 540 312	150 46,5 15,8	0,124	0,074/0,076 0,078/0,081 0,075/0,077	0,072
	0,66 0,595 0,66	3 816 2 208 1 272	550 173 61	0,124	0,065/0,067 0,07/0,072 0,065/0,067	0,072
Однослойная	0,565 0,685	3 056 1 760	226 71,5	0,130	0,11/0,113 0,12/0,15	0,078

Технические и обмоточные данные трехфазных асинхронных

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу $P_н$, *вт*	Напряжение $U_н$, *в*	При номинальной нагрузке: Ток $I_н$, *а*	К. п. д. η, %	$\cos\varphi$	Скорость вращения *n*, *об/мин*	$\frac{M_{макс}}{M_н}$	Пусковые характеристики: $\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$
АОЛ 11/2	180	220	0,86	66	0,86	2 800	2,2	5,0	2,0
		380	0,5						
		127	1,5						
		220	0,86						
АОЛ 11/4	120	220	0,78	58	0,72	1 400	2	4,0	1,8
		380	0,45						
		127	1,35						
		220	0,78						
АОЛ 12/2	270	220	1,2	69	0,86	2 800	2,2	5,0	2,0
		380	0,7						
		127	2,1						
		220	1,2						
АОЛ 12/4	180	220	1,04	62	0,74	1 400	2	4,0	1,8
		380	0,6						
		127	1,8						
		220	1,04						

микродвигателей единой серии первого габарита

Обмотка статора									
Размеры проводников d, *мм* (гол./изол.)	Число проводников в пазу, $U_п$	Тип обмотки	Соединение фаз	Коэффициент заполнения паза, $k_{зап}$	Число эффективных проводников последовательно на фазу $N_э$	Сопротивление фазы при 15° С r_S, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_м$ (гол), *кг*	Длина проводников, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*
0,33/0,42 ПЭЛШО	181	Однослойная обмотка	Δ/Y	0,625	1 448	54	0,18	0,6	0,134
0,41/0,555 ПЭЛБО	105		Δ/Y	0,63	840	20,5		0,53	
0,27/0,36 ПЭЛШО	254		Δ/Y	0,645	2 032	87,5	0,138	0,43	0,092
0,35/0,44 ПЭЛШО	147		Δ/Y	0,555	1 176	30,3		0,42	
0,35/0,44 ПЭЛШО	135		Δ/Y	0,51	1 080	39,2	0,196	0,54	0,134
0,40/0,635 ПЭЛБО	78		Δ/Y	0,615	624	11,6		0,62	
0,33/0,42 ПЭЛШО	193		Δ/Y	0,665	1 544	49,5	0,154	0,55	0,092
0,41/0,555 ПЭЛБО	112		Δ/Y	0,675	896	18,6		0,49	

Технические и обмоточные данные однофазных

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу $P_н$, *вт*	Напряжение $U_н$, *в*	При номинальной нагрузке			
			Ток $I_н$, *а*	К. п. д. η, %	cosφ	Скорость вращения *n*, *об/мин*
АОЛБ 11/2	80	380 220 127	0,6 1,0 1,75	51	0,72	2 890
АОЛГ 11/2	80	380 220 127	0,6 1,0 1,75	51	0,72	2 890
АОЛД 11/2	120	380 220 127	0,55 0,9 1,55	61	0,98	2 850
АОЛБ 11/4	50	380 220 127	0,55 1,1 1,9	34	0,62	1 420
АОЛГ 11/4	50	380 220 127	0,65 1,1 1,9	34	0,62	1 420
АОЛД 11/4	80	380 220 127	0,55 0,95 1,65	47	0,82	1 450
АОЛБ 12/2	120	380 220 127	0,8 1,4 2,4	55	0,72	2 890
АОЛГ 12/2	120	380 220 127	0,8 1,4 2,4	55	0 72	2 890
АОЛД 12/2	180	380 220 127	0,75 1,3 2,25	64	0,98	2 850
АОЛБ 12/4	80	380 220 127	0,85 1 45 2,5	41	0,62	1 420
АОЛГ 12/4	80	380 220 127	0,85 1,45 2,5	41	0,62	1 420
АОЛД 12/4	120	380 220 127	0,75 1,3 2,25	52	0,82	1 450

микродвигателей единой серии первого габарита

$\frac{M_{макс}}{M_н}$	Пусковые характеристики		Конденсатор			
			Пусковой		Рабочий	
	$\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	$C_п$, *мкф*	U_C, *в*	$C_р$, *мкф*	U_C, *в*
2,2	7,5	1	— — —	— — —	— — —	— — —
2,2	5	2	9 25 75	520 300 175	— — —	— — —
2,0	4,5	1,2	4 10 30	520 300 175	2 6 18	870 500 290
1,8	7,5	1,2	— — —	— — —	— — —	— — —
1,8	4,0	2,5	7 20 60	520 300 175	— — —	— — —
2,0	4,0	1,2	2 6 18	520 300 175	1 3 9	870 500 290
2,2	7,5	1	— — —	— — —	— — —	— — —
2,2	5	2	8 25 75	520 300 175	— — —	— — —
2,0	4,5	1,2	5 15 45	520 300 175	4 10 30	870 500 290
1,8	7,5	1,2	— — —	— — —	— — —	— — —
1,8	4,0	2,5	8 25 45	520 300 175	— — —	— — —
2,0	4,0	1,2	2 6 18	520 300 175	2 4 12	870 500 290

Тип электро-двигателя	Обмотка			
	Глав			
	Число пазов Z_A	Размеры провода d (гол./изол.), *мм*	Число проводников в пазу $u_{пA}$	Коэффициент заполнения паза $k_{зап}$
АОЛБ 11/2	16	0,35/0,44 ПЭЛШО 0,44/0,585 ПЭЛБО 0,62/0,77 ПЭЛБО	180 104 60	0,68 0,695 0,695
АОЛГ 11/2	16	0,35/0,44 ПЭЛШО 0,44/0,585 ПЭЛБО 0,51/0,77 ПЭЛБО	180 104 60	0,68 0,695 0,695
АОЛД 11/2	12	0,31/0,4 ПЭЛШО 0,36/0,515 ПЭЛБО 0,55/0,7 ПЭЛБО	216 125 72	0,675 0,645 0,69
АОЛБ 11/4	16	0,27/0,36 ПЭЛШО 0,35/0,485 ПЭЛБО 0,49/0,635 ПЭЛБО	250 145 84	0,635 0,665 0,66
АОЛГ 11/4	16	0,27/0,36 ПЭЛШО 0,35/0,485 ПЭЛБО 0,49/0,635 ПЭЛБО	250 145 84	0,635 0,665 0,66
АОЛД 11/4	12	0,25/0,325 ПЭЛШО 0,35/0,44 ПЭЛШО 0,44/0,585 ПЭЛБО	283 164 36	0,585 0,62 0,635
АОЛБ 12/2	16	0,35/0,485 ПЭЛБО 0,51/0,66 ПЭЛБО 0,72/0,88 ПЭЛБО	138 80 46	0,635 0,68 0,695
АОЛГ 12/2	16	0,35/0,485 ПЭЛБО 0,51/0,66 ПЭЛБО 0,72/0,88 ПЭЛБО	138 80 46	0,635 0,68 0,695
АОЛД 12/2	12	0,35/0,44 ПЭЛШО 0,44/0,585 ПЭЛБО 0,64/0,79 ПЭЛБО	169 98 57	0,64 0,66 0,695
АОЛБ 12/4	16	0,33/0,42 ПЭЛШО 0,41/0,555 ПЭЛБО 0,59/0,74 ПЭЛБО	195 113 65	0,67 0,685 0,695
АОЛГ 12/4	16	0,33/0,42 ПЭЛШО 0,41/0,55 ПЭЛБО 0,59/0,74 ПЭЛБО	195 113 65	0,67 0,685 0,695
АОЛД 12/4	12	0,31/0,4 ПЭЛШО 0,38/0,515 ПЭЛБО 0,55/0,7 ПЭЛБО	216 125 72	0,675 0,65 0,685

статора				
ная фаза				
Число эффективных проводников последовательно на фазу $N_{эA}$	Сопротивление фазы при 15° C r_{SA}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_м$ (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*
2 880 1 664 960	78 31,0 9,1	0,160	0,36/0,37 0,36/0,37 0,42/0,43	0,114
2 880 1 664 960	78 31,0 9,1	0,160	0,36/0,37 0,36/0,37 0,42/0,43	0,114
2 592 1 500 864	106 40,5 11,2	0,173	0,3/0,31 0,26/0,27 0,32/0,33	0,127
4 000 2 320 1 344	145 50 14,8	0,116	0,24/0,25 0,23/0,24 0,26/0,27	0,07
4 000 2 320 1 344	145 50 14,8	0,116	0,24/0,25 0,23/0,24 0,26/0,27	0,07
3 396 1 968 1 140	148 44 16	0,120	0,18/0,19 0,2/0,21 0,19/0,2	0,074
2 208 1 280 736	72,5 19,6 5,7	0,176	0,34/0,35 0,41/0,42 0,47/0,48	0,114
2 208 1 280 736	72,5 19,6 5,7	0,176	0,34/0,35 0,41/0,42 0,47/0,48	0,114
2 028 1 176 684	71 26 7,2	0,189	0,33/0,34 0,31/0,32 0,37/0,38	0,127
3 120 1 808 1 040	86 30 8,9	0,132	0,32/0,33 0,27/0,28 0,33/0,34	0,07
3 120 1 808 1 040	86 30 8,9	0 132	0,32/0,33 0,27/0,28 0,33/0,34	0,07
2 592 1 500 864	83 32 8,8	0,136	0,24/0,25 0,21/0,22 0,25/0,26	0,074

Тип электродвигателя	Обмотка				
	Вспомогатель				
	Число пазов Z_B	Размеры провода d (гол. изол.), *мм*	Число проводников в пазу $u_{пB}$		Коэффициент заполнения паза $k_{зап}$
			эфф.	полн.	
АОЛБ 11/2	8	0,25/0,325 ПЭЛШО	126	290	0,6
		0,35/0,44 ПЭЛШО	73	167	0,63
		0,44/0,585 ПЭЛБО	42	96	0,64
АОЛГ 11/2	8	0,21/0,285 ПЭЛШО	394	394	0,625
		0,29/0,38 ПЭЛШО	228	228	0,64
		0,38/0,515 ПЭЛБО	132	132	0,68
АОЛД 11/2	12	0,29/0,38 ПЭЛШО	235	235	0,665
		0,35/0,485 ПЭЛБО	136	136	0,625
		0,51/0,66 ПЭЛБО	79	79	0,67
АОЛБ 11/4	8	0,27/0,36 ПЭЛШО	161	238	0,59
		0,35/0,485 ПЭЛБО	93	135	0,62
		0,47/0,615 ПЭЛБО	54	70	0,575
АОЛГ 11/4	8	0,2/0,275 ПЭЛШО	464	464	0,685
		0,27/0,36 ПЭЛШО	268	268	0,68
		0,35/0,44 ПЭЛШО	155	155	0,585
АОЛД 11/4	12	0,19/0,25 ПЭЛШО	489	489	0,595
		0,25/0,325 ПЭЛШО	283	283	0,585
		0,35/0,44 ПЭЛШО	164	164	0,62
АОЛБ 12/2	8	0,31/0,40 ПЭЛШО	90	200	0,62
		0,41/0,555 ПЭЛБО	52	116	0,695
		0,55/0,7 ПЭЛБО	30	68	0,65
АОЛГ 12/2	8	0,25/0,325 ПЭЛШО	306	306	0,63
		0,35/0,44 ПЭЛШО	177	177	0,67
		0,44/0,585 ПЭЛБО	102	102	0,685
АОЛД 12/2	12	0,35/0,44 ПЭЛШО	154	154	0,58
		0,47/0,615 ПЭЛБО	89	89	0,66
		0,67/0,82 ПЭЛБО	51	51	0,67
АОЛБ 12/4	8	0,31/0,40 ПЭЛШО	142	197	0,615
		0,41/0,555 ПЭЛБО	82	114	0,695
		0,55/0,70 ПЭЛБО	47	67	0,64
АОЛГ 12/4	8	0,21/0,285 ПЭЛШО	405	405	0,645
		0,29/0,38 ПЭЛШО	235	235	0,665
		0,38/0,515 ПЭЛБО	136	136	0,7
АОЛД 12/4	12	0,23/0,305 ПЭЛШО	377	377	0,685
		0,29/0,38 ПЭЛШО	218	219	0,615
		0,38/0,515 ПЭЛБО	126	126	0,655

статора

ная фаза

Число эффективных проводников последовательно на фазу $N_{эB}$	Сопротивление фазы при 15° C r_{sB}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_М$ (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть $l_л$, *м*	Тип обмотки
1 008 1 336 768	160 44 16,2	0,178	0,18/0,188 0,2/0,208 0,19/0,196	0,132	Однослойная
3 152 1 824 1 056	290 83 29,5	0,178	0,18/0,188 0,19/0,196 0,19/0,196	0,132	
2 820 1 632 948	132 52,5 14,3	0,173	0,29/0,3 0,25/0,258 0,3/0,31	0,127	
1 288 744 432	78 26,3 8,45	0,31	0,13/0,136 0,13/0,136 0,13/0,136	0,085	
3 712 2 144 1 240	276 88 30	0,31	0,14/0,144 0,15/0,156 0,14/0,144	0,085	
5 868 3 396 1 968	445 149 43,5	0,120	0,18/0,188 0,18/0,188 0,2/0,208	0,074	
720 416 240	74 24,0 8,0	0,194	0,21/0,22 0,21/0,22 0,33/0,34	0,132	
2 448 1 416 816	173 51,0 18,6	0,194	0,21/0,22 0,24/0,25 0,22/0,23	0,132	
1 846 1 068 612	59 21 3,9	0,189	0,27/0,28 0,32/0,33 0,37/0,38	0,127	
1 136 656 376	55 18 5,9	0,167	0,16/0,164 0,16/0,164 0,17/0,176	0,085	
3 240 1 880 1 088	247 75 25	0,167	0,15/0,156 0,17/0,176 0,16/0,164	0,085	
4 524 2 616 1 512	265 96 32,4	0,136	0,23/0,24 0,21/0,22 0,21/0,22	0,074	

Технические и обмоточные данные трехфазных асин

Тип электро-двигателя	Номинальная мощность на валу $P_н$, *вт*	Напряжение $U_н$, *в*	При номинальной нагрузке: Ток $I_н$, *а*	К.п.д. η, %	$\cos\varphi$	Скорость вращения *n*, *об/мин*	$\frac{M_{макс}}{M_н}$	Пусковые характеристики: $\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$
АОЛ 21/2	400	220	1,70	72	0,85	2 800	2,2	5,0	2,0
		380	0,98						
		127	2,95						
		220	1,70						
АОЛ 21/4	270	220	1,43	66	0,75	1 400	2	4,0	1,8
		380	0,83						
		127	2,48						
		220	1,43						
АОЛ 22/2	600	220	2,48	75	0,85	2 800	2,2	5,0	2,0
		380	1,43						
		127	4,3						
		220	2,48						
АОЛ 22/4	400	220	1,97	70	0,76	1 400	2	4,0	1,8
		380	1,14						
		127	3,41						
		220	1,97						

хронных микродвигателей единой серии второго габарита

Обмотка статора									
Размеры провода d (гол./изол.), *мм*	Число проводников в пазу $u_п$	Тип обмотки	Соединение фаз	Коэффициент заполнения паза $k_{зап}$	Число эффективных проводников последовательно на фазу	Сопротивление фазы при 15° С r_S, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди (гол./изол.) $G_м$, *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*
0,44/0,605 ПЭЛБО	112	Однослойная обмотка	Δ/Y	0,716	896	21,2	0,205	0,74/0,82	0,149
0,62/0,79 ПЭЛБО	65		Δ/Y	0,71	520	6,2		0,86/0,92	
0,35/0,51 ПЭЛБО	160		Δ/Y	0,727	1 280	37	0,158	0,52/0,59	0,102
0,49/0,655 ПЭЛБО	93		Δ/Y	0,697	744	11		0,6/0,65	
0,53/0,70 ПЭЛБО	85		Δ/Y	0,728	680	12,2	0,225	0,9/0,98	0,149
0,72/0,9 ПЭЛБО	49		Δ/Y	0,694	392	3,8		0,96/1,03	
0,41/0,575 ПЭЛБО	125		Δ/Y	0,722	1 000	28,6	0,178	0,63/0,70	0,102
0,57/0,74 ПЭЛБО	72		Δ/Y	0,689	576	7,1		0,7/0,76	

Технические и обмоточные данные однофазных асинхронных

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу $P_н$, *вт*	Напряжение $U_н$, *в*	При номинальной нагрузке			
			Ток $I_н$, *а*	К. п. д. η, %	cos φ	Скорость вращения *n*, *об/мин*
АОЛБ 21/2	180	380 220 127	1,1 1,9 3,3	59	0,72	2 890
АОЛГ 21/2	180	380 220 127	1,1 1,9 3,3	59	0,72	2 890
АОЛД 21/2	270	380 220 127	1,05 1,85 3,2	67	0,98	2 850
АОЛБ 21/4	120	380 220 127	1,1 1,9 3,3	47	0,62	1 420
АОЛГ 21/4	120	380 220 127	1,1 1,9 3,3	47	0,62	1 420
АОЛД 21/4	180	380 220 127	1,0 1,75 3,0	57	0,82	1 450
АОЛБ 22/2	270	380 220 127	1,55 2,7 4,7	63	0,72	2 890
АОЛГ 22/2	270	380 220 127	1,55 2,7 4,7	63	0,72	2 890
АОЛД 22/2	400	380 220 127	1,55 2,65 4,6	70	0,98	2 850
АОЛБ 22/4	180	380 220 127	1,45 2,5 4,3	53	0,62	1 420
АОЛГ 22/4	180	380 220 127	1,45 2,5 4,3	53	0,62	1 420
АОЛД 22/4	270	380 220 127	1,4 2,4 4,2	62	0,82	1 450

микродвигателей единой серии второго габарита

$\frac{M_{макс}}{M_н}$	Пусковая характеристика		Конденсатор			
			пусковой		рабочий	
	$\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	Емкость, *мкф*	Напряжение, *в*	Емкость, *мкф*	Напряжение, *в*
2,2	7,5	1	—	—	—	—
2,2	5	2	10 30 90	520 300 175	—	—
2,0	4,5	1,2	8 25 75	520 300 175	5 15 45	870 500 290
1,8	7,5	1,2	—	—	—	—
1,8	4	2,5	12 35 115	520 300 175	—	—
2,0	4	1,2	3 10 30	520 300 175	2 6 18	870 500 290
2,2	7 5	1	—	—	—	—
2,2	5	2	12 35 115	520 300 175	—	—
2,0	4,5	1,2	13 40 120	520 300 175	8 25 75	870 500 290
1,8	7,5	1,2	—	—	—	—
1,8	4	2 5	13 40 120	520 300 175	—	—
2,0	4	1,2	4 12 35	520 300 175	3 8 24	870 500 290

Тип электродвигателя	Число пазов Z_A	Обмотка		
		Главная		
		Размеры провода d (гол./изол.)	Число проводников в пазу $u_{пA}$	Коэффициенг заполнения паза $k_{зап}$
АОЛБ 21/2	16	0,41/0,555 ПЭЛБО 0,59/0,74 ПЭЛБО 0,8/0,96 ПЭЛБО	123 71 41	0,665 0,68 0,66
АОЛГ 21/2	16	0,41/0,555ПЭЛБО 0,59/0,74ПЭЛБО 0,8/0,96ПЭЛБО	123 71 41	0,665 0,68 0,66
АОЛД 21/2	12	0,38/0,515 ПЭЛБО 0,55/0,7 ПЭЛБО 0,74/0,9 ПЭЛБО	137 79 46	0,63 0,675 0,65
АОЛБ 21/4	16	0,35/0,485 ПЭЛБО 0,49/0,635 ПЭЛБО 0,69/0,84 ПЭЛБО	165 95 55	0,675 0,67 0,675
АОЛГ 21/4	16	0,35/0,485 ПЭЛБО 0,49/0,635 ПЭЛБО 0,69/0,84 ПЭЛБО	165 95 55	0,675 0,67 0,675
АОЛД 2 /4	12	0,35/0,44 ПЭЛШО 0,47/0,615ПЭЛБО 0,64/0,79 ПЭЛБО	182 105 61	0,61 0,69 0,66
АОЛБ 22/2	16	0,51/0,66 ПЭЛБО 0,72/0,88 ПЭЛБО 0,96/1,12 ПЭЛБО	88 51 30	0,665 0,685 0,655
АОЛГ 22/2	16	0,51/0,66 ПЭЛБО 0,72/0,88 ПЭЛБО 0,96/1,12 ПЭЛБО	88 51 30	0,665 0,685 0,655
АОЛД 22/2	12	0,47/0,615 ПЭЛБО 0,67/0,82 ПЭЛБО 0,9/1,06 ПЭЛБО	102 59 34	0,67 0,69 0,665
АОЛБ 22/4	16	0,41/0,555 ПЭЛБО 0,59/0,74 ПЭЛБО 0,8/0,96 ПЭЛБО	125 72 42	0 67 0,685 0,675
АОЛГ 22/4	16	0,41/0,555 ПЭЛБО 0,59/0,74 ПЭЛБО 0,8/0,96 ПЭЛБО	125 72 42	0,67 0,685 0,675
АОЛД 22/4	16	0,38/0,515 ПЭЛБО 0,56/0,7 ПЭЛБО 0,77/0,93 ПЭЛБО	132 76 44	0,61 0,65 0,665

статора

фаза

Число эффективных проводников последовательно на фазу	Сопротивление фазы при 15° C r_{SA}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_м$ (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*
1 968 1 136 656	49,5 13,8 4,35	0,186	0,44/0,45 0,51/0,53 0,55/0,57	0,13
1 968 1 136 656	49,5 13,8 4,35	0,186	0,44/0,45 0,51/0,53 0,55/0,57	0,13
1 644 948 552	51,5 14,2 4,6	0,200	0,33/0,34 0,4/0,41 0,42/0,43	0,144
2 640 1 520 880	64 18,6 5,5	0,13	0,29/0,3 0,33/0,34 0,39/0,4	0,074
2 640 1 520 880	64 18,6 5,5	0,13	0,29/0,3 0,33/0,34 0,39/0,4	0,074
2 184 1 260 732	58 18,5 5,8	0,142	0,27/0,28 0,28/0,288 0,3/0,312	0,086
1 408 816 480	25,5 7,3 2,45	0,206	0,53/0,55 0,6/0,62 0,64/0,66	0,13
1 408 816 480	2,55 7,3 2,45	0,206	0,53/0,55 0,6/0,62 0,64/0,66	0,13
1 224 708 408	28 7,95 2,5	0,220	0,42/0,43 0,49/0,51 0,51/0,53	0,144
2 000 1 152 672	40 11,1 3,6	0,15	0,35/0,36 0,42/0,432 0,46/0,472	0,074
2 000 1 152 672	40 11,1 3,6	0,15	0,35/0,36 0,42/0,432 0,46/0,472	0,074
1 584 912 528	40,5 10,9 3,26	0,162	0,36/0,372 0,31/0,32 0,35/0,36	0,086

Тип электродвигателя	Число пазов Z_B	Обмотка			
		Вспомогательная			
		Размеры провода d (гол./изол.), *мм*	Число проводников в пазу $u_{пB}$		Коэффициент заполнения паза $k_{зап}$
			эфф.	полн.	
АОЛБ 21/2	8	0,31/0,4 ПЭЛШО 0,38/0,515 ПЭЛБО 0,53/0,68 ПЭЛБО	111 64 37	243 124 81	0,68 0,57 0,655
АОЛГ 21/2	8	0,27/0,36 ПЭЛШО 0,35/0,48 ПЭЛШО 0,49/0,635 ПЭЛБО	278 161 93	278 161 93	0,63 0,66 0,655
АОЛД 21/2	12	0,41/0,555 ПЭЛБО 0,57/0,72 ПЭЛБО 0,8/0,96 ПЭЛБО	125 72 42	125 72 42	0,67 0,65 0 675
АОЛБ 21/4	8	0,33/0,42 ПЭЛШО 0,44/0,585 ПЭЛБО 0,59/0,74 ПЭЛБО	138 80 46	200 116 68	0,61 0,69 0,65
АОЛГ 21/4	8	0,25/0,32 ПЭЛШО 0,35/0,44 ПЭЛШО 0,44/0,586 ПЭЛБО	340 197 114	340 197 114	0,63 0,665 0,68
АОЛД 21/4	12	0,27/0,36 ПЭЛШО 0,35/0,485 ПЭЛШО 0,49/0,635 ПЭЛБО	294 170 98	294 170 98	0,665 0,69 0,69
АОЛБ 22/2	8	0,38/0,515 ПЭЛБО 0,53/0,68 ПЭЛБО 0,72/0,88 ПЭЛБО	59 34 20	149 86 50	0,69 0,695 0,675
АОЛГ 22/2	8	0,29/0,38 ПЭЛШО 0,38/0,515 ПЭЛБО 0,51/0,68 ПЭЛБО	258 149 86	258 149 86	0,65 0,685 0,65
АОЛД 22/2	12	0,51/0,66 ПЭЛБО 0,72/0,88 ПЭЛБО 0,96/1,12 ПЭЛБО	88 51 30	88 51 30	0,67 0,685 0,655
АОЛБ 22/4	8	0,35/0,44 ПЭЛШО 0,47/0,615 ПЭЛБО 0,64/0,79 ПЭЛБО	116 67 39	175 10 59	0,59 0,665 0,64
АОЛГ 22/1	8	0,27/0,96 ПЭЛШО 0,35/0,485 ПЭЛШО 0,49/0,635 ПЭЛБО	290 168 97	290 168 97	0,66 0,69 0,68
АОЛД 22/4	12	0,33/0,42 ПЭЛШО 0,41/0,555 ПЭЛБО 0,57/0,72 ПЭЛБО	220 127 74	220 127 74	0,675 0,68 0,655

статора

фаза

Число эффективных проводников последовательно на фазу	Сопротивление фазы при 15° С r_{SB}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_м$ (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*	Тип обмотки
888 512 296	96 32 10,8	0,207	0,24/0,25 0,21/0,22 0,265/0,274	0,151	Однослойная
2 224 1 288 744	144 49,5 14,7	0,207	0,24/0,25 0,23/0,24 0,26/0,27	0,151	
1 500 864 504	40,5 12,0 3,6	0,200	0,35/0,36 0,39/0,4 0,45/0,47	0,144	
1 104 640 368	50 16,2 5,3	0,148	0,18/0,188 0,2/0,208 0,2/0,208	0,092	
2 720 1 576 912	146 44 15,9	0,148	0,18/0,188 0,22/0,228 0,18/0,188	0,092	
3 528 2 040 1 176	156 54 15,8	0,142	0,25/0,26 0,25/0,26 0,28/0,288	0,086	
472 272 160	42,5 12,6 4,0	0,227	0,27/0,28 0,3/0,31 0,33/0,34	0,151	
2 064 1 192 688	127 40,5 13,7	0,227	0,28/0,29 0,27/0,28 0,28/0,29	0,151	
1 056 612 360	20,4 5,55 1,95	0,220	0,42/0,43 0,52/0,54 0,52/0,54	0,144	
926 536 312	44 13,9 4,4	0,168	0,2/0,208 0,21/0,22 0,23/0,24	0,092	
2 320 1 344 776	122 41,5 12,9	0,168	0,2/0,208 0,2/0,208 0,22/0,228	0,092	
2 640 1 524 888	90 33 10	0,162	0,33/0,34 0,29/0,3 0,33/0,34	0,086	

Технические и обмоточные данные однофазных асинхронных

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу $P_н$, *вт*	Напряжение, $U_н$, *в*	При номинальной нагрузке			
			Ток $I_н$, *а*	К. п. д. η, %	cos φ	Скорость вращения *n*, *об/мин*
АОЛБ 31/2	400	380 220 127	2,15 3,8 6,55	66	0,72	2 920
АОЛГ 31/2	400	380 220 127	2,15 3,8 6,55	66	0,72	2 920
АОЛД 31/2	600	380 220 127	2,2 3,8 6,6	73	0,98	2 930
АОЛБ 31/4	270	380 220 127	1,9 3,3 5,7	60	0,62	1 440
АОЛГ 31/4	270	380 220 127	1,9 3,3 5,7	60	0,62	1 440
АОЛД 31/4	400	380 220 127	1,9 3,3 5,7	67	0,82	1 440
АОЛБ 32/2	600	380 220 127	3,2 5,5 9,5	69	0,72	2 940
АОЛГ 32/2	600	380 220 127	3,2 5,5 9,5	69	0,72	2 940
АОЛД 32/2	1 000	380 220 127	3,5 6,0 10,4	77	0,98	2 940
АОЛБ 32/4	400	380 220 127	2,55 4,4 7,6	67	0,62	1 440
АОЛГ 32/4	400	380 220 127	2,55 4,4 7,6	67	0,62	1 440
АОЛД 32/4	600	380 220 127	2,6 4,55 7,9	73	0,82	1 460

микродвигателей единой серии третьего габарита

$\frac{M_{макс}}{M_н}$	Пусковые характеристики		Конденсатор			
			пусковой		рабочий	
	$\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	*С, мкф*	U_C, *в*	*С, мкф*	U_C, *в*
2,2	9	1	— — —	— — —	— — —	— — —
2,2	5,5	2	27 80 240	520 300 175	— — —	— — —
2,2	5,5	1,2	30 90 270	520 300 175	12 35 150	870 500 290
1,9	8	1,2	— — —	— — —	— — —	— — —
1,9	4,5	2,5	20 60 180	520 300 175	— — —	— — —
2,2	4,5	1,2	8,5 2,5 75	520 300 175	4 12 34	870 500 290
2,2	9	1	— — —	— — —	— — —	— — —
2,2	6	2	30 90 270	520 300 175	— — —	— — —
2,9	7	1,2	42 125 330	520 300 175	15 45 135	870 500 290
1,9	8	1,2	— — —	— — —	— — —	— — —
1,9	4,5	2,5	24 70 210	520 300 175	— — —	— — —
2,2	5	1,2	18 90 175	520 300 175	7 32 60	870 500 290

Тип электро-двигателя	Обмотка			
	Главная			
	Число пазов Z_A	Размеры провода d (гол./изол.), *мм*	Число проводников в пазу $u_{пA}$	Коэффи-циент запол-нения паза $k_{зап}$
АОЛБ 31/2	16	0,64/0,79 0,9/1,06 1,2/1,385	79 46 27	0,66 0,695 0,69
АОЛГ 31/2	16	0,64/0,79 0,9/1,06 1,2/1,385	79 46 27	0,66 0,695 0,69
АОЛД 31/2	12	0,62/0,77 0,85/1,02 1,16/1,345	86 50 29	0,68 0.695 0,7
АОЛБ 31/4	16	0,55/0,7 0,77/0,93 1,09/1,225	121 70 40	0,675 0,69 0,685
АОЛГ 31/4	16	0,55/0,7 0,77/0,93 1,09/1,225	121 70 40	0,675 0,69 0,685
АОЛД 31/4	12	0,33/0,68 0,74/0,9 1,0/1,185	126 73 42	0,665 0,675 0,675
АОЛБ 32/2	16	0,8/0,96 1,08/1,265 1,0/1,185	55 32 37	0,675 0,685 0,69
АОЛГ 32/2	16	0,8/0,96 1,08/1,265 1,0/1,185	55 32 37	0,675 0,685 0,69
АОЛД 32/2	12	0,8/0,96 1,08/1,265 1,0/1,185	55 32 37	0,675 0,685 0,69
АОЛБ 32/4	16	0,69/0,84 0,96/1,12 0,86/1,02	85 49 56/2	0,68 0,7 0,665
АОЛГ 32/4	16	0,69/0,84 0,96/1,12 0,86/1,02	85 41 56/2	0,68 0,7 0,665
АОЛД 32/4	12	0,67/0,88 0,93/1,09 0,83/0,99	8 5 60/2	0,675 0,69 0,67

статора				
фаза				
Число эффективных проводников последовательно на фазу	Сопротивление фазы при 15° С r_{SA}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_{м}$, (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть, $l_{л}$, *м*
1 264 736 432	17,0 5,05 1,66	0,244	0,88/0,92 1,05/1,08 1/1,04	0,18
1 264 736 432	17,0 5,05 1,66	0,244	0,88/0,92 1,05/1,08 1/1,04	0,18
1 032 600 348	15,0 4,5 1,43	0,244	0,68/0,70 0,76/0,78 0,8/0,82	0,18
1 936 1 120 640	23,0 6,7 2,22	0,157	0,64/0,66 0,73/0,76 0,8/0,82	0,093
1 936 1 120 640	23,0 6,7 2,22	0,157	0,64/0,66 0,73/0,76 0,8/0,82	0,093
1 512 876 504	18/8 5,6 1,77	0,154	0,46/0,48 0,52/0,54 0,54/0,55	0,09
880 512 296	8,8 2,8 0,94	0,28	1,1/1,14 1,18/1,22 1,16/1.2	0,18
880 512 296	8,8 2,8 0,94	0,28	1,1/1,15 1,18/1,22 1,16/1,2	0,18
660 384 222	6,6 2,08 0,71	0,28	0,83/0,83 0,88/0,91 0,87/0,9	0,18
1 360 784 448	12,6 3,74 1,32	0,193	0,87/0,9 0.97/1,0 0,9/0,93	0,093
1 360 784 448	12,6 3,74 1,32	0,193	0,87/0,9 0,97/1,0 0,9/0,93	0,093
1 056 612 360	10,2 3,05 1,13	0,19	0,63/0,66 0,7/0,72 0,66/0,68	0,09

Тип электро-двигателя	Обмотка				
	Вспомогательная				
	Число пазов Z_B	Размеры провода d (гол./изол.), *мм*	Число проводников в пазу $u_{пB}$		Коэффициент заполнения паза $k_{зап}$
			эфф.	полн.	
АОЛБ 31/2	8	0,44/0,585 0,64/0,79 0,86/1,02	62 36 21	142 82 47	0,65 0,68 0,655
АОЛГ 31/2	8	0,38/0,515 0,53/0,68 0,74/0,9	190 110 63	190 110 63	0,675 0,68 0,68
АОЛД 31/2	12	0,64/0,79 0,9/1,06 1,2/1,385	79 46 27	79 46 27	0,655 0,69 0,69
АОЛБ 31/4	8	0,41/0,555 0,59/0,74 0,8/0,96	128 74 43	192 112 65	0,675 0,695 0,68
АОЛГ 31/4	8	0,35/0,44 0,59/0,74 0,8/0,95	305 74 43	305 112 65	0,675 0,695 0,68
АОЛД 31/4	12	0,41/0,555 0,59/0,74 0,8/0,96	190 110 64	190 110 64	0,665 0,685 0,67
АОЛБ 32/2	8	0,41/0,555 0,59/0,74 0,89/0,99	79 46 27	155 90 53	0,68 0,66 0,695
АОЛГ 32/2	8	0,41/0,555 0,57/0,72 0,8/0,96	158 97 56	158 97 56	0,65 0,675 0,69
АОЛД 32/2	12	0,8/0,96 1,08/1,263 1,01/1,185	55 32 37	55 32 37	0,675 0,685 0,69
АОЛБ 32/4	8	0,44/0,585 0,54/0,79 0,86/1,02	81 47 27	167 97 57	0,65 0,69 0,675
АОЛГ 32/4	8	0,35/0,485 0,51/0,56 0,69/0,84	240 139 80	240 139 80	0,64 0,69 0,645
АОЛД 32/4	12	0,59/0,74 0,8/0,96 1,08/1,26	111 64 37	111 64 37	0,695 0,67 0,675

статора					
фаза					
Число эффективных проводников последовательно на фазу	Сопротивление фазы при 15° C r_{SB}, *ом*	Средняя длина проводника $l_{ср}$, *м*	Вес меди $G_М$ (гол./изол.), *кг*	Длина проводника, приходящаяся на лобовую часть, $l_л$, *м*	Тип обмотки
496 288 168	92,6 8,9 2,81	0,244	0,38/0,4 0,46/0,48 0,48/0,5	0,18	Однослойная
1 520 880 504	58 17,4 5,1	0,244	0,38/0,4 0,42/0,44 0,47/0,49	0,18	
948 552 324	12,8 3,8 1,25	0,244	0,66/0,68 0,76/0,78 0,8/0,82	0,18	
1 024 592 344	35 9,9 3,12	0,169	0,31/0,32 0,37/0,38 0,4/0,42	0,105	
2 440 592 344	76,5 9,9 3,12	0,169	0,35/0,36 0,37/0,38 0,4/0,42	0,105	
2 280 1 320 768	47,5 13,3 4,25	0,154	0,41/0,43 0,49/0,51 0,53/0,55	0,09	
632 368 216	47 13,3 3,95	0,28	0,41/0,43 0,49/0,51 0,57/0,6	0,18	
1 264 776 448	48 15,2 4,45	0,28	0,42/0,44 0,5/0,52 0,56/0,58	0,18	
560 384 222	65,5 2,08 0,71	0,28	0,83/0,186 0,88/0,91 0,87/0,9	0,18	
648 376 216	32,5 8,85 2,92	0,205	0,37/0,39 0,46/0,48 0,49/0,51	0,105	
1 920 1 112 640	73 20,0 6,25	0,205	0,34/0,35 0,41/0,43 0,44/0,46	0,105	
1 332 768 444	16,6 5,2 1,64	0,19	0,61/0,63 0,65/0,67 0,69/0,71	0,09	

Основные размеры асинхронных микродвигателей

Типоразмер электродвигателя	Размеры активной						
							Заготовительный вес стали
	D_a	D	δ_I^{**}	$d_в$	$\frac{l_s}{l_R}$	δ_{III}^{*}	$G_{ст}$
	мм	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*кг*
011/2 011/4	84	51,5	$\frac{0,3}{0,25}$	15,2	$\frac{38}{40}$	0,25	2,2
012/2 012/4	84	51,5	$\frac{0,3}{0,25}$	15,2	$\frac{52}{54}$	0,25	3,0
11/2 11/4	102	60	$\frac{0,35}{0,3}$	18,7	$\frac{46}{48}$	0,25	3,95
12/2 12/4	102	60	$\frac{0,35}{0,3}$	18,7	$\frac{62}{64}$	0,25	5,32

* δ_{III} — воздушный зазор трехфазного двигателя.

** δ_I — воздушный зазор однофазных двигателей; большая величина соответ

единой серии нулевого и первого габаритов

стали статора

Число пазов						Площадь паза в свету $\frac{\text{с изол.}}{\text{б. изол.}}$
Z_S	b_2	d_1	$h_щ$	h	$b_щ$	$\frac{S_п}{S'_п}$
	мм	мм	мм	мм	мм	мм²
18	8,7	6,7	0,5	8,5	1,5	57,3/42
18	8,7	6,7	0,5	8,5	1,5	57,3/42
24	7,5	5,3	0,5	12	1,8	70,8/51,2
24	7,5	5,3	0,5	12	1,8	70,8/51,2

ствует машинам с $2p=2$, меньшая — с $2p=4$.

Размеры коротко

Типоразмер двигателя	Число пазов					
	Z_k	$\frac{d_1}{d_2}$	$h_щ$	h	$b_щ$	$S_п$
		мм	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*^{2}
011/2 011/4	15	$\frac{5}{4}$	0,5	7,5	1,5	30
012/2 012/4	15	$\frac{5}{4}$	0,5	7,5	1,5	30
11/2 11/4	18	$\frac{5}{4}$	0,45	9	1	36,3
12/2 12/4	18	$\frac{5}{4}$	0,45	9	1	36,3

замкнутого ротора

a	b	Число крыльев f	$S_к$	Вес алюминия без крыльев G′	Полный вес алюминия G	Скос пазов
мм	мм		мм²	кг	кг	
7,5	11,5	$\frac{6}{23}$	85	0,102	0,110	1 деление паза статора
7,5	11,5	$\frac{6}{23}$	85	0,119	0,130	
8,5	15,3	$\frac{6}{30}$	130	0,18	0,21	
8,5	15,3	$\frac{6}{30}$	130	0,21	0,24	

Основные размеры асинхронных микродвигателей

Типоразмер двигателя	Размеры активной						Заготовительный вес стали
	D_a	D	δ_I **	$d_в$	$\frac{l_S}{l_R}$	δ_{III} *	$G_{ст}$
	мм	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*кг*
21/2 21/4	120	72	$\frac{0,4}{0,3}$	20,7	$\frac{56}{58}$	0,25	5,55
22/2 22/4	120	72	$\frac{0,4}{0,3}$	20,7	$\frac{56}{58}$	0,25	6,55
31/2	145	82	0,45	26	$\frac{64}{66}$	—	10,78
31/4	145	89	0,35	26	$\frac{64}{66}$	—	10,78
32/2	145	82	0,45	26	$\frac{100}{102}$	—	16,85
32/4	145	89	0,35	26	$\frac{100}{102}$	—	16,85

* δ_{III}—воздушный зазор трехфазного двигателя;

** δ_I —воздушный зазор однофазных двигателей; большая величина соответ

единой серии второго и третьего габаритов

стали статора

Число пазов						Площадь паза в свету $\frac{\text{с изол.}}{\text{б. изол.}}$
Z_S	b_2	d_1	$h_{щ}$	h	$b_{щ}$	$\frac{S_п}{S'_п}$
	мм	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*²
24	8,3	5,5	0,5	12,5	2,2	$\frac{79,2}{57,2}$
24	8,3	5,5	0,5	12,5	2,2	$\frac{79,2}{57,2}$
24	10	7,7	0,5	12,5	2,5	$\frac{99,8}{75}$
24	9,6	7	0,5	14,8	2,5	$\frac{112,3}{87,7}$
24	10	7,7	0,5	12,5	2,5	$\frac{99,8}{75}$
24	9,6	7	0,5	14,8	2,5	$\frac{112,3}{87,7}$

ствует $2p = 2$, меньшая $2p = 4$.

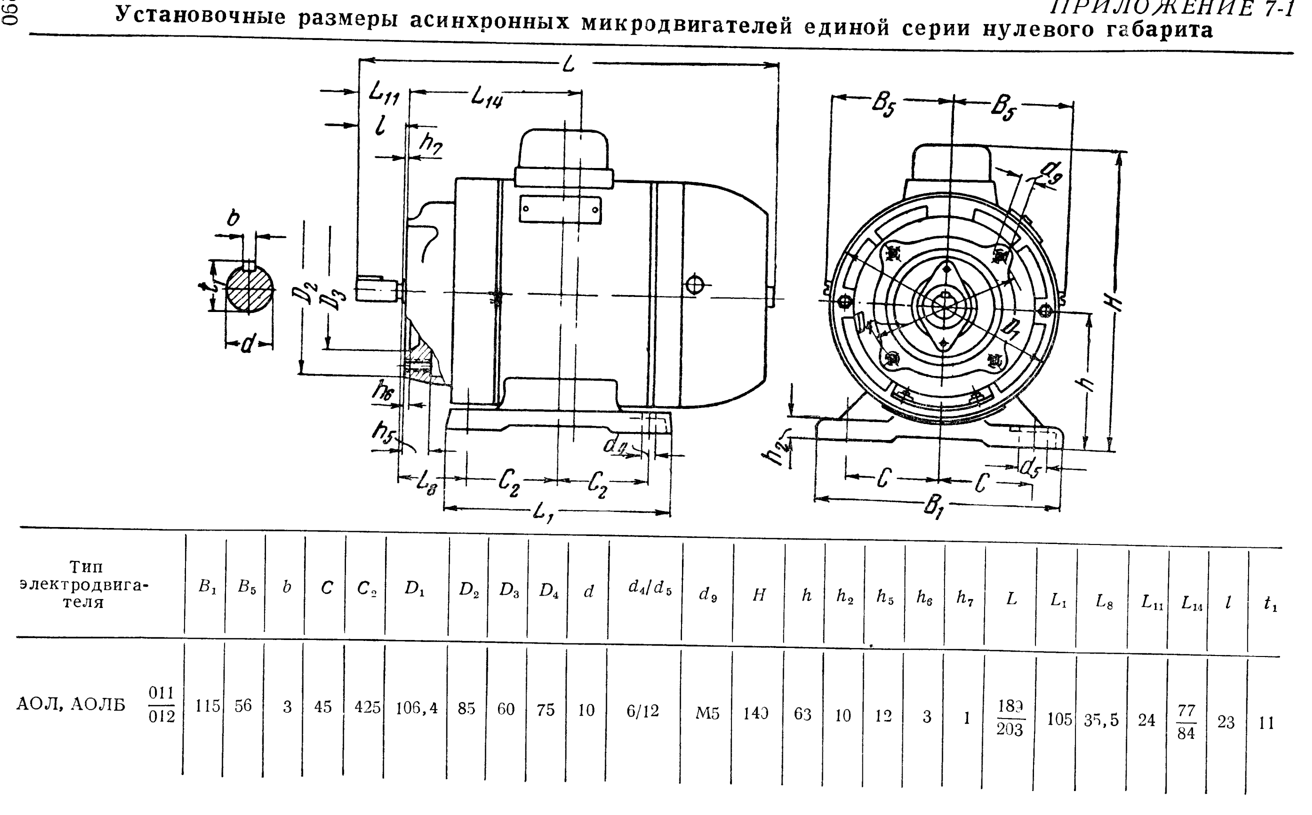
Типо-размер двигателя	Ротор коротко					
	Число пазов					
	$Z_к$	$\frac{d_1}{d_2}$	$h_щ$	h	$b_щ$	$S_п$
		мм	*мм*	*мм*	*мм*	*мм*²
21/2 21/4	18	$\frac{5,5}{4,4}$	0,5	9,5	1	42,2
22/2 22/4	18	$\frac{5,5}{4,4}$	0,5	9,5	1	42,2
31/2	20	$\frac{6,5}{4,5}$	0,9	12	1	60,2
31/4	18	$\frac{6,6}{4,4}$	0,4	12,5	1	63,5
32/2	20	$\frac{6,5}{4,5}$	0,9	12	1	60,2
32/4	18	$\frac{6,6}{4,4}$	0,4	12,5	1	63,5

замкнутый

a	*b*	Число крыльев *f*	$S_{к}$	Вес алюминия без крыльев *G'*	Полный вес алюминия *G*	Скос пазов
мм	*мм*		*мм*²	*кг*	*кг*	
8,3	18	$\frac{6}{35}$	150	0,25	0,29	1 деление паза статора
8,3	18	$\frac{6}{35}$	150	0,25	0,29	
12	17,5	$\frac{9}{36}$	210	0,43	0,49	
9	19	$\frac{11}{36}$	170	0,4	0,52	
12	17,5	$\frac{9}{36}$	210	0,55	0,61	1,5 деления паза статора
9	19	$\frac{11}{36}$	170	0,52	0,64	1 деление паза статора

ПРИЛОЖЕНИЕ 7-1

Установочные размеры асинхронных микродвигателей единой серии нулевого габарита



Тип электродвигателя		B_1	B_5	b	C	C_2	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_4/d_5	d_9	H	h	h_2	h_5	h_6	h_7	L	L_1	L_8	L_{11}	L_{14}	l	t_1
АОЛ, АОЛБ	$\frac{011}{012}$	115	56	3	45	425	106,4	85	60	75	10	6/12	М5	140	63	10	12	3	1	$\frac{189}{203}$	105	35,5	24	$\frac{77}{84}$	23	11

ПРИЛОЖЕНИЕ 7-2

Установочные размеры асинхронных микродвигателей единой серии первого и второго габаритов

Тип электро-двигателя	B_1	B_5	b	C	C_2	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_4/d_5	d_9	H	h	h_2	h_5	h_6	h_7	L	L_1	L_3	L_8	L_{11}	L_{14}	L_{15}	l	t_1
АОЛ $\frac{11}{12}$	135	65	5,4	52,5	50	123,5	84	70	85	12	7/16	M6	170	75	12	12	3	1	$\frac{220}{236}$	125	37,5	40	31	$\frac{89}{97}$	—/8	30	13,5
АОЛ $\frac{21}{22}$	135	78	4	65	60	150,3	96	80	100	14	9/18	M8	197	90	14	13	3	1	$\frac{250}{270}$	150	41	42	31	$\frac{101}{111}$	—/10	30	15,5

Рабочие конденсаторы

Конденсаторы металлобумажные герметизированные частотные МБГЧ (ТУ УБО. 462. 011). Конденсаторы рассчитаны на окружающую температуру от — 60 до + 70° С и относительную влажность воздуха до 98% Допуски на величину емкости: ± 10% (2-й класс) и ± 20% (3-й класс)

Габариты и вес конденсаторов МБГЧ

Рабочее напряжение, *в* / Емкость, *мкф*	150	250	500	750	1 000	Вес, *г*
	Ширина корпуса *B*, *мм*					
0,25	—	—	31	—	—	60
0,5	—	16	—	—	—	35
1	—	31	—	—	—	60
2	16	—	—	—	—	35
4	31	—	—	—	—	60
0,25	—	—	—	21	31	—
0,5	—	—	16	31	51	—
1	—	—	31	56	—	—
2	—	16	51	—	—	—
4	—	31	—	—	—	—
10	21	61	—	—	—	—
1	—	—	—	—	39	500
2	—	—	—	39	—	500
4	—	—	34	—	—	420

В	16	21	31	51	56	61
Вес, г	90	120	150	230	250	270

Примечания: 1. При переходе с частоты 50 *гц* на частоты 100 и 500 *гц* рабочее напряжение соответственно понижается на 25 и 50%.

2. Тип конденсатора обозначается МБГЧ-2-250-10П. (2—вид крепления; 250—рабочее напряжение, *в*; 10—емкость, *мкф*; П—допуск на величину емкости ± 10%).

Пусковые конденсаторы

Конденсаторы электролитические пусковые ЭП (ТУ УБО. 464. 011). Конденсаторы рассчитаны на окружающую температуру от —40 до +60° С и относительную влажность воздуха до 90%. Допускаемые отклонения емкости ±20%

Режим эксплуатации

Напряжение на конденсаторе	175 *в*	300 *в*	Число включений в час при продолжительности одного включения 3 *сек*
Емкость, *мкф*	5; 10; 15; 20; 30; 50; 70	1; 1,5; 3; 5; 8; 10	30
	100	15; 20; 30	20

Продолжительность непрерывной работы не свыше 12 *ч*

Габариты и вес конденсаторов ЭП

175 *в*	300 *в*	*D*, *мм*	*H*, *мм*	Вес, *г*	Эскиз
Емкость, *мкф*					
30	8	33	68	100	
50	10	33	93	130	
70	15	37	93	180	
100	20	37	117	220	
—	30	43	117	280	
5	1,5	24	43	40	
10 и 15	3	24	70	60	
20	5	29	70	80	

Не более 9

H^{+2}

$\Phi D^{+0,5}_{-1,5}$

Не более 9

H^{+2}

$\Phi D^{+0,5}_{-1,5}$

Обозначение типа: ЭП175-10
(175 — напряжение, *в*; 10 — емкость, *мкф*)

Обозначение габаритов	L	Габаритные и уста
		Испол
		фланцевое Φ_3
041	122	
042	132	
051	142	
052	153	
061	171	
062	187	
071	190	
072	210	

электродвигатели малой мощности серий АВ и АВЕ

новочные размеры / нения / амортизационное	Скорость вращения, *об/мин*	Мощность полезная, *вт*: трехфазное, АВ	Мощность полезная, *вт*: однофазное, АВЕ	Вес, *кг*, исполнение: фланцевое $Ф_3$ (В1, В2)	Вес, *кг*, исполнение: амортизационное	Маховой момент ротора, *кГ·см²*
	1 400	18	10	1,3	1,5	2,1
	2 800	30	18	1,5	1,7	1,7
	1 400	30	18	1,6	1,8	2,4
	2 800	50	30	1,7	1,9	2,1
	1 400	50	30	2,0	2,3	4,9
	2 800	80	50	2,2	2,5	8
	1 400	80	50	2,5	2,8	5,9
	2 800	120	80	2,8	3,1	11
	1 400	120	80	3,8	4,2	16
	2 800	180	120	3,9	4,3	17
	1 400	180	120	4,7	5,1	21
	2 800	270	180	4,8	5,2	22
	1 400	270	180	6,2	6,6	44
	2 800	400	270	6,3	6,7	45
	1 400	400	270	7,6	8,0	57
	2 800	600	400	7,9	8,3	58

Асинхронные однофазные микродвигатели с коротко

Тип двигателя	Полезная мощность на валу $P_н$, *вт*	Номинальное напряжение $U_н$, *в*	Номинальный ток $I_н$, *а*	Номинальная скорость вращения $n_н$, *об/мин*	Потребляемая мощность P_S, *вт*
ДАО	150	$\frac{127}{220}$	$\frac{3,3}{1,9}$	1 420	250
ДАО-7	150	220	2,05	1 440	270
МСМ-0,2У	180	$\frac{127}{220}$	$\frac{3,2}{1,85}$	1 425	280
СТА	170 180	127 220	3,2 2,0	1 400 1 400	330 330
СТА-МО	180	220	2,0	1 400	330
ДХМ-3 ДХМ-5	93	$\frac{127}{220}$	2,23 1,29	1 425 1 440	158
ДХМ-7	93	220	1,25	1 440	160
877-А 877-Б	30	$\frac{127}{220}$	1,0 0,48	2 850	80 66
876-А 876-Б	50	$\frac{127}{220}$	2,4 1,4	1 400	170
882-А 882-Б	80	$\frac{127}{220}$	2,9	1 380	220
ДО-50	50	110	2,1	1 425	100

замкнутым ротором с пусковым сопротивлением

К. п. д. η, %	cos φ	Номинальный момент $M_н$, *кГ·см*	Пусковые показатели		$\frac{M_{макс}}{M_н}$
			$\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$	
60	0,65	10,2	5,5	1,5	2,04
55	0,6	10,1	5,07	1,32	1,94
64,5	0,73	12,3	8	1,5	1,8
52 55	0,7 0,7	11,8 12,5	7,5 7,5	1,1 1,1	2 2
55	0,7	12,5	7,5	1,1	2
59	0,56	6,3	7,8	1,825	2,23
58	0,56	6,3	6,3	1,84	2,3
37,5 45,5	0,55	1,02	8,5	1,2	2,0
29,4	0,5	3,48	6,0	1,75	2,0
36,3	0,5	5,64	7,0	1,5	1,6
50	0,45	3,41	—	1	1,3

Тип двигателя	Режим работы	Превышение температуры обмотки θ, °C	Конструктивные	
			Исполнение двигателя	Система охлаждения
ДАО	Длительный	50	Защищенное	Естественное
ДАО-7	„	—	„	„
МСМ-0,2У	„	65	Закрытое	„
СТА	Кратковременный (15 *мин*)	40	„	„
СТА-МО	То же	40	„	„
ДХМ-3 ДХМ-5	—	40	Открытое встроенное	„
ДХМ-7	—	—	То же	„
877-А 877-Б	Длительный	69 55	Закрытое	„
876-А 876-Б	„	50	Открытое	Вентилятор
882-А 882-Б	„	50	„	„
ДО-50	„	53	Закрытое	Обдув извне

особенности			
Положение вала	Количество рабочих концов вала	Форма крепления	Подшипники
Вертикальное	1	Фланцевое	Шариковые
Горизонтальное	1	»	»
»	1	Приливы корпуса	»
Вертикальное	1	Фланцевое	»
Горизонтальное	2	Приливы корпуса	»
—	—	—	—
—	—	—	—
Горизонтальное	1	На лапах	Скольжения
»	1	То же	Шариковые
»	1	» »	»
»	1	Фланцевое	»

Тип двигателя	Дополнительное оснащение	Габариты двигателя, $D_н \times l_м$, *мм*	Вес, *кг*
ДАО	Тепловое реле РТ-10 и трехкнопочный пускатель	∅ 175×215	8,5
ДАО-7		∅ 148×178	6,2
МСМ-0,2У	Тепловое реле РТ-10 и центробежный выключатель	∅ 160×250	9,3
СТА		∅ 168×226	10,4 10,25
СТА-МО	Центробежное реле РТ-10 и трехкнопочный пускатель	∅ 168×300	12
ДХМ-3 ДХМ-5	—	∅ 160×85	ст. 3,5 рот. 1,8
ДХМ-7	—	∅ 139×39,5	—
877-А 877-Б	Центробежный выключатель	∅ 95×135	2,8
876-А 876-Б	То же	∅ 130×165	6,0
882-А 882-Б		∅ 130×200	7,2
ДО-50	То же	∅ 136×150	5,4

Весовой показатель, *вт/кг*	Срок службы, лет	Область применения	Примечание
17,6	10		
24,2	10	Стиральная машина типа СМР-1,5	
19,35	—		
16,3 17,5	1		
15	1	Стиральная машина с механическим отжимом	
—	10	Привод компрессора в холодильниках	Завод выпускает отдельные узлы статора и ротора
—	10		
10,7	1		
8,35	1	Привод медицинского оборудования	
11,1	1		
9,25	—	Кинопроектор	

Асинхронные однофазные микродвигатели с

Тип двигателя	Полезная мощность на валу $P_н$, *вт*	Номинальное напряжение, $U_н$, *в*	Номинальный ток $I_н$, *а*	Номинальная скорость вращения $n_н$, *об/мин*	Потребляемая мощность P_1, *вт*
879-А	20 30 70	127	0,7 1,4 1,25	900 1 400 2 700	80 115 140
879-Б	20 30 70	220	0,4 0,8 0,7	900 1 400 2 700	80 115 140
Ш-87	150	127	2,5	1 320 2 700	300
Ш-88	150	220	1,5	1 320 2 700	300
ДГХ-0,5	480	127	6,75	1 430	720
МОК-30	30	110	0,55	3 000	54
КД-30	50	220	0,41	2 800	83,5
КД-2	4,5	127	0,3	1 450	29,3
ДВА-У4	5	$\frac{220}{110}$	$\frac{0,21}{0,42}$	695	40

короткозамкнутым ротором конденсаторные

К. п. д. η, %	cos φ	Номинальный момент $M_н$, *кГ·см*	Пусковые показатели		$\frac{M_{макс}}{M_н}$,	Пусковые $C_п$ и рабочие $C_р$ емкости, *мкф*
			$\frac{I_к}{I_н}$	$\frac{M_к}{M_н}$		
25 26 50	0,75 0,5 0,75	2,16 2,085 2,53	1,8	0,3	1,25 2,0 1,25	6
25 26 50	0,75 0,5 0,75	2,16 2,085 2,53	1,7	0,3	1,15 1,75 1,15	2
50	0,75	11,1 5,4	4,0 6,0	0,24	1,4 1,6	8
50	0,75	11,1 5,4	4,0 6,0	0,15	1,4 1,6	8
66,7	0,84	32,7	4,3	1,58	1,7	60 12
55,5	0,91	0,975	3,0	2,0	2,3	8 4
60	0,93	1,74	2,69	0,632	1,66	4
15	0,77	0,3	1,66	1,66	3,3	2,5 ($R_р$ = 130 *ом*)
13	0,94	0,7		1,86		1,25

Тип двигателя	Режим работы	Превышение температуры обмотки ϑ, °С	Конструктивные	
			Исполнение двигателя	Система охлаждения
879-А	Длительный	40	Закрытое	Вентилятор наружный
879-Б	"	50	"	То же
Ш-87	Повторно-кратковременный, *ПВ*=60%	60	"	Естественное
Ш-88	То же	60	"	"
ДГХ-0,5	Длительный	60	Закрытое встраиваемое	"
МОК-30	"	40	Закрытое	Вентилятор наружный
КД-30	*ПВ*=25%	—	—	Естественное
КД-2	—	55	—	Самовентиляция
ДВА-У4	Длительный	60	Открытое	Естественное

особенности

Положение вала	Количество рабочих концов вала	Форма крепления	Подшипники
Вертикальное	1	Фланцевое	Шариковые
»	1	»	»
Горизонтальное	2	На лапах	»
»	2	То же	»
Вертикальное	1	—	Скольжения
Горизонтальное	1	Фланцевое	Шарикорадиальные
»	1	—	Скольжения
Вертикальное	1	Хомут	»
»	1	Фланцевое	»

Тип двигателя	Габариты двигателя $D_н \times l_н$, *мм*	Вес, *кг*	Весовой показатель, *вт/кг*
879-А	∅ 160×200	4,8	4,16 6,25 14,56
879-Б	∅ 160×200	4,8	4,16 6,25 14,56
Ш-87	∅ 165×300	22	6,83
Ш-88	∅ 165×300	22	6,83
ДГХ-0,5	∅ 160×145	11,3	4,25
МОК-30	∅ 84×102	2,15	13,95
КД-30	∅ 91×111	2,2	23,7
КД-2	∅ 96×95	1,65	2,73
ДВА-У4	∅ 110×132	4,2	1,2

Срок службы, лет	Область применения	Примечание
1	Центрифуга медицинская	Трехскоростной
1		
1	Электрошлейфмашина для зуботехнических работ	Двухскоростной
1		
1	Холодильный агрегат „Азербайджан“	
1	Кинопроектор 16 КПЗЛ-3	
1,5	Контрольно-кассовый аппарат типа КИ и КО	
10	Магнитофон	
2 000 *ч*	Магнитофон (ведущий двигатель)	

Основные обозначения

A — линейная нагрузка.
a — число пар параллельных ветвей обмотки
$a \times b$ — размеры к. з. кольца.
B_δ — индукция в воздушном зазоре.
B_{ZS} — индукция в зубцах статора.
B_{ZR} — индукция в зубцах ротора.
B_{aS} — индукция в ярме статора.
B_{aR} — индукция в ярме ротора.
$b_{щ}$ — ширина прорези паза.
b_{ZS}, b_{ZR} — ширина зубцов статора и ротора.
$b_{ск}$ — скос пазов, рассчитанный по дуге окружности ротора.
$b_{1/3}$ — расчетная ширина паза.
$C_{р}$ — рабочая емкость.
$C_{п}$ — пусковая емкость.
$D_{а}$ — наружный диаметр статора.
D — внутренний диаметр статора.
D' — внешний диаметр ротора.
$D_{кл}$ — средний диаметр к. з. кольца ротора.
$d_{в}$ — диаметр вала.
$d_{из}$ — диаметр изолированного провода.
$E_{ф}$ — фазная э. д. с.
E_1, E_2 — э. д. с. прямой и обратной последовательностей.
F_δ — магнитное напряжение воздушного зазора.
F_{ZS}, F_{ZR} — магнитное напряжение зубцов статора и ротора.
F_{aS}, F_{aR} — магнитное напряжение ярма статора и ротора
$F_{цепи}$ — магнитное напряжение магнитной цепи.
f — частота.
G_{aS}, G_{aR} — вес ярма статора и ротора.
$G_{м}$ — вес меди.
G_{ZS}, G_{ZR} — вес зубцов статора и ротора.
H — напряженность магнитного поля.
$h_{п}$ — высота паза.
$h_{щ}$ — высота прорези паза.
h_{12} — расстояние между средними диаметрами паза d_1 и d_2.
h_{aS}, h_{aR} — высота спинки статора и ротора.
h_1 — высота меди в пазу.
h_2, h_3, h_5 — размеры меди в пазу.
h_{ZS}, h_{ZR} — высота зубцов статора и ротора.
$I_{н}$ — номинальный фазный ток.
I_μ — намагничивающий ток
I_A, I_B — токи фаз A и B.

I — линейный (полный) ток конденсаторного двигателя.
$I_к$ — пусковой ток.
I_R — ток ротора.
I_{A1}, I_{A2} — токи прямой и обратной последовательностей фазы A.
I_{B1}, I_{B2} — токи прямой и обратной последовательностей фазы B.
I'_{A1}, I''_{A1} — активная и реактивная составляющие токов прямой последовательности фазы A.
I'_{B1}, I''_{B1} — активная и реактивная составляющие токов прямой последовательности фазы B.
I'_{A2}, I''_{A2} — активная и реактивная составляющие токов обратной последовательности фазы A.
I'_{B2}, I''_{B2} — активная и реактивная составляющие токов обратной последовательности фазы B.
I', I'' — активная и реактивная составляющие полного тока.
I_{RA} — ток ротора, приведенный к фазе A.
I_{RA1}, I_{RA2} — токи рогора прямой и обратной последовательностей приведенные к фазе A.
k_D — отношение диаметра расточки к наружному диаметру статора.
$k_{зап}$ — коэффициент заполнения паза.
$k_с$ — коэффициент заполнения пакета сталью.
$k_{\delta S}$, $k_{\delta R}$ — коэффициенты воздушного зазора статора и ротора.
k_δ — общий коэффициент воздушного зазора.
$k_{ск}$ — коэффициент скоса пазов.
k_μ — коэффициент демпфирования для ротора
k_Z — коэффициент насыщения.
$k_{обр}$ — коэффициент обработки.
$k_р$ — коэффициент распределения обмотки.
$k_у$ — коэффициент укорочения обмотки.
k_{oS} — обмоточный коэффициент обмотки статора.
k — коэффициент трансформации.
L_S — общая длина провода фазы статора.
l — расчетная длина машины.
l_S — длина пакета статора.
$l_{ср}$ — средняя длина полувитка.
$l_л$ — длина лобовой части полувитка обмотки статора.
$M_{макс}$ — максимальный момент.
M — электромагнитный момент.
$M_к$ — пусковой момент.
m — число фаз.
m_m — кратность максимального момента.
$m_к$ — кратность пускового момента.
$n_с$ — синхронная скорость вращения.
n — скорость вращения ротора.

$P_н$ — номинальная мощность.
P_R — полезная мощность двигателя.
P'_S — расчетная мощность.
$P_э$ — электромагнитная мощность.
$P_{мS}$, $P_{мR}$ — потери в обмотке статора и ротора.
P_{cZS}, P_{cZR} — потери в стали зубцов статора и ротора.
P_{caS}, P_{caR} — потери в стали ярма статора и ротора.
P_{cS}, P_{cR} — полные потери в стали статора и ротора.
$P_к$ — потери в конденсаторе.
$P_п$ — потери в пусковом сопротивлении.
$P_{мех}$ — механические потери.
$P_д$ — добавочные потери.
P_S — потребляемая мощность
p — число пар полюсов.
Q_A, Q_B — число пазов на полюс в фазах A и B.
q — число пазов на полюс и фазу.
r_S — активное сопротивление обмотки статора.
r_R — активное сопротивление обмотки ротора.
$r_{ст}$ — сопротивление стержня ротора.
$r_{кл}$ — сопротивление короткозамыкающего кольца.
$r_п$ — пусковое сопротивление.
r_C — активное сопротивление конденсатора.
r_{SA}, r_{SB} — активные сопротивления обмоток статора A и B.
r_{A1}, r_{A2} — активные сопротивления фазы A прямой и обратной последовательностей.
r'_{RA1}, r'_{RA2} — активные сопротивления разветвления фазы A прямой и обратной последовательностей.
$r_{Aк}$, $r_{Bк}$ — активные сопротивления главной и вспомогательной фаз при пуске.
$r'_{Bк}$ — активное сопротивление вспомогательной фазы и пускового элемента, соответствующее заданной кратности пускового момента.
$r'_{RAк}$, $r'_{RBк}$ — активные сопротивления разветвления фаз A и B при пуске.
S_S — сечение провода.
$S_п$ — площадь паза в штампе.
$S'_п$ — площадь паза без изоляции.
$S_{из}$ — площадь изоляции паза.
$s_н$ — номинальное скольжение.
s_0 — скольжение реального холостого хода.
s_m — «максимальное» скольжение.
t_S, t_R — зубцовое деление статора и ротора.

U — фазное напряжение.

$U_н$ — номинальное фазное напряжение.

U_C — напряжение на конденсаторе.

$u_п$ — число проводников в пазу.

w_S — число витков обмотки статора.

x_S — индуктивное сопротивление статора.

x_R — индуктивное сопротивление ротора.

x_m — индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре.

x_{SA}, x_{SB} — индуктивные сопротивления обмоток статора A и B.

x_{A1}, x_{A2} — индуктивные сопротивления фазы A прямой и обратной последовательностей.

x'_{RA1}, x'_{RA2} — индуктивные сопротивления разветвления фазы A прямой и обратной последовательностей.

$x_{Cр}$ — реактивное сопротивление рабочего конденсатора.

$x_{Cп}$ — реактивное сопротивление пускового конденсатора.

$x'_{Bк}$ — реактивное сопротивление вспомогательной фазы и пускового элемента.

$x'_{RAк}$, $x'_{RBк}$ — реактивные сопротивления разветвления фаз A и B при коротком замыкании.

$x_к$ — индуктивное сопротивление короткого замыкания.

$y_{ср}$ — средний шаг секции по пазам.

Z_{A1}, Z_{B1} — полные сопротивления прямой последовательности фаз A и B.

Z_{A2}, Z_{B2} — то же, но обратной последовательности.

Z_{SA}, Z_{SB} — полные сопротивления обмоток статора A и B.

Z'_{RA1} Z'_{RA2} — полные сопротивления разветвления прямой и обратной последовательностей.

Z_S, Z_R — число пазов статора и ротора.

$\alpha_{ск}$ — центральный угол скоса пазов в электрических градусах.

α'_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия.

β_S — коэффициент использования.

β — шаг секции в долях полюсного деления.

$\beta_{ск}$ — скос пазов в долях зубцового деления.

δ — воздушный зазор.

Δ_S — плотность тока в обмотке статора.

$\Delta_{ст}$ — плотность тока в стержнях ротора.

$\Delta_к$ — плотность тока в кольце.

ξ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения индукции в ярме.

η — коэффициент полезного действия.

λ — отношение длины машины к полюсному делению.

λ_S — магнитная проводимость рассеяния статора.
$\lambda_п$ — магнитная проводимость пазового рассеяния.
λ_δ — магнитная проводимость рассеяния высших гармоник.
$\lambda_л$ — магнитная проводимость лобового рассеяния.
λ_R — магнитная проводимость рассеяния ротора.
ρ — удельное сопротивление.
τ — полюсное деление.
τZ — полюсное деление в пазах.
Φ — магнитный поток.